

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2005-502266

(P2005-502266A)

(43) 公表日 平成17年1月20日(2005.1.20)

(51) Int. Cl.⁷

H04B 10/02

G02F 1/01

H04B 10/18

F I

H04B 9/00

G02F 1/01

M

テーマコード (参考)

2H079

5K102

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 96 頁)

(21) 出願番号 特願2003-526032 (P2003-526032)
 (86) (22) 出願日 平成13年8月31日 (2001.8.31)
 (85) 翻訳文提出日 平成16年1月14日 (2004.1.14)
 (86) 国際出願番号 PCT/JP2001/007568
 (87) 国際公開番号 W02003/021822
 (87) 国際公開日 平成15年3月13日 (2003.3.13)
 (81) 指定国 EP (DE, FR, GB), CN, JP, US

(71) 出願人 000005223
 富士通株式会社
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
 1号
 (74) 代理人 100074099
 弁理士 大菅 義之
 (74) 代理人 100067987
 弁理士 久木元 彰
 (72) 発明者 ラスムッセン, イエンス シー.
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
 1号 富士通株式会社内
 (72) 発明者 石川 丈二
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
 1号 富士通株式会社内

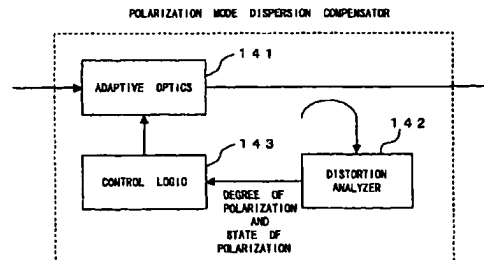
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 偏光度に基づく偏波モード分散補償器

(57) 【要約】

偏光計により光信号の偏光度が計測され、偏波モード分散補償器の適応光学系を調整するフィードバック信号を供給するために用いられる。偏光計の偏波特性は、キャリブレーションにより高い精度でその偏光計に一致するように決定され、フィードバック信号の生成に用いられる。

【選択図】 図29



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

入力光信号を受け取り、出力光信号を出力する光学部と、
偏光計を含み、前記出力光信号を解析して、該偏光計から出力される複数の強度信号を用いたキャリブレーションにより決定された該偏光計の偏波特性を用いることで、該出力光信号の偏光度を表すフィードバック信号を生成する歪みアナライザと、
前記フィードバック信号に基づいて、前記光学部を調整する制御信号を生成する制御部とを備えることを特徴とする偏波モード分散補償器。

【請求項 2】

前記偏光計は、前記複数の強度信号を生成する複数の光学部品を含み、前記歪みアナライザは、該偏光計のインストルメント行列の情報を前記偏波特性として用いることで、前記フィードバック信号を生成し、該インストルメント行列の情報は、ポアンカレ球を完全にカバーするような複数の異なる偏波状態の光を該偏光計に入力して該偏光計から出力される該複数の強度信号を計測することで得られることを特徴とする請求項 1 記載の偏波モード分散補償器。

10

【請求項 3】

前記インストルメント行列の情報は、前記複数の強度信号のうちの 2 つを前記複数の異なる偏波状態に対して平面上にプロットし、プロットされた複数の点を囲む楕円の方位角および楕円率を決定することで得られることを特徴とする請求項 2 記載の偏波モード分散補償器。

20

【請求項 4】

前記複数の強度信号のうちの 2 つの各々について前記プロットされた複数の点の最大および最小強度がさらに決定され、前記方位角および楕円率とともに前記インストルメント行列の情報として用いられることを特徴とする請求項 3 記載の偏波モード分散補償器。

【請求項 5】

前記偏光計は、4 つの強度信号を生成する 4 つの検光子を形成する複数の光学部品を含み、該複数の光学部品は、該 4 つの検光子のうちの 3 つの等価検光子偏波がポアンカレ球上で 120 度の角度間隔を有し、該 4 つの検光子のうちのもう 1 つの等価検光子偏波が該ポアンカレ球上で該 3 つの検光子の等価検光子偏波と直交するように、配置されることを特徴とする請求項 1 記載の偏波モード分散補償器。

30

【請求項 6】

前記偏光計は、4 つの強度信号を生成する 4 つの検光子を形成する複数の光学部品を含み、該複数の光学部品は、該 4 つの検光子の等価検光子偏波がポアンカレ球上でダイヤモンドの複数の原子のような構造を形成するように、配置されることを特徴とする請求項 1 記載の偏波モード分散補償器。

【請求項 7】

前記歪みアナライザは、前記出力光信号の偏波状態を表すフィードバック信号を生成し、前記制御部は、前記偏光度を表すフィードバック信号と該偏波状態を表すフィードバック信号の両方に基づいて前記制御信号を生成することを特徴とする請求項 1 記載の偏波モード分散補償器。

40

【請求項 8】

前記制御部は、前記出力光信号のビット誤り率を表すフィードバック信号を受け取り、前記偏光度を表すフィードバック信号と該ビット誤り率を表すフィードバック信号の両方に基づいて前記制御信号を生成することを特徴とする請求項 1 記載の偏波モード分散補償器。

【請求項 9】

前記歪みアナライザは、前記出力光信号の偏波状態を表すフィードバック信号を生成し、前記制御部は、該出力光信号のビット誤り率を表すフィードバック信号を受け取り、前記偏光度を表すフィードバック信号、該偏波状態を表すフィードバック信号、および該ビット誤り率を表すフィードバック信号に基づいて前記制御信号を生成することを特徴とする

50

請求項 1 記載の偏波モード分散補償器。

【請求項 1 0】

入力光信号から複数の強度信号を生成する複数の光学部品を含む偏光計と、
前記偏光計から出力される複数の強度信号を用いたキャリブレーションにより決定された
該偏光計の偏波特性を用いることで、前記複数の強度信号から、前記入力光信号の偏光度
を表す偏波モード分散補償のためのフィードバック信号を生成する処理部と
を備えることを特徴とする歪みアナライザ。

【請求項 1 1】

3つのビームスプリッタと、
零度に対して所与の許容誤差範囲内にある2つの偏光子と、
60度に対して所与の許容誤差範囲内にある1つの偏光子と、
-60度に対して所与の許容誤差範囲内にある1つの偏光子と、
波長の4分の1に対して所与の許容誤差範囲内にある1つの位相遅延器とを備え、
前記ビームスプリッタ、偏光子、および位相遅延器は、4つの強度信号を生成する4つの
検光子を形成し、該4つの検光子のうちの3つの等価検光子偏波がポアンカレ球上で120
度の角度間隔を有し、該4つの検光子のうちのもう1つの等価検光子偏波が該ポアンカ
レ球上で該3つの検光子の等価検光子偏波と直交するように、配置されることを特徴とす
る偏光計。

10

【請求項 1 2】

3つのビームスプリッタと、
零度に対して所与の許容誤差範囲内にある2つの偏光子と、
60度に対して所与の許容誤差範囲内にある1つの偏光子と、
-60度に対して所与の許容誤差範囲内にある1つの偏光子と、
波長の4分の1に対して所与の許容誤差範囲内にある1つの位相遅延器と、
波長の18.48分の1に対して所与の許容誤差範囲内にある3つの位相遅延器とを備え、
前記ビームスプリッタ、偏光子、および位相遅延器は、4つの強度信号を生成する4つの
検光子を形成し、該4つの検光子の等価検光子偏波がポアンカレ球上でダイヤモンドの複
数の原子のような構造を形成するように、配置されることを特徴とする偏光計。

20

【請求項 1 3】

3つのビームスプリッタと、
零度に対して所与の許容誤差範囲内にある2つの偏光子と、
60度に対して所与の許容誤差範囲内にある1つの偏光子と、
-60度に対して所与の許容誤差範囲内にある1つの偏光子と、
波長の4分の1から18.48分の1を差し引いた値に対して所与の許容誤差範囲内にあ
る1つの位相遅延器と、
波長の18.48分の1に対して所与の許容誤差範囲内にある1つの位相遅延器とを備え、
前記ビームスプリッタ、偏光子、および位相遅延器は、4つの強度信号を生成する4つの
検光子を形成し、該4つの検光子の等価検光子偏波がポアンカレ球上でダイヤモンドの複
数の原子のような構造を形成するように、配置されることを特徴とする偏光計。

30

【請求項 1 4】

偏光計から出力される複数の強度信号を用いたキャリブレーションにより偏光計の偏波特
性を決定し、
入力光信号から光学部を介して出力光信号を生成し、
前記出力光信号を解析して、前記偏光計の偏波特性を用いることで、該出力光信号の偏光
度を表すフィードバック信号を生成し、
前記フィードバック信号に従って前記光学部を調整する
ことを特徴とする偏波モード分散補償方法。

40

【発明の詳細な説明】

50

【技術分野】

【0001】

本発明は、光伝送システムにおける偏波モード分散による信号歪みを解析して、偏波モード分散を緩和するために用いられる適応光学系を調整するためのフィードバック信号を供給する偏波モード分散補償器に関する。

【背景技術】

【0002】

光伝送システムのビットレートが高ければ高いほど、光ファイバの一定量の偏波モード分散が伝送される信号をより大きく歪ませる。

偏波モード分散により、いわゆるシングルモードファイバ内の2つのモードは異なる速度で伝搬する。初期パルスはそのエネルギーを2つのモードに分配する。それらの2つのモードには伝搬中に群遅延時間差が生じる。これは、ファイバの終端におけるパルスの広がりをもたらす。2つのモード間の群遅延時間差がビット持続時間のオーダーになればなるほど、隣接するパルスはより大きく重複することになり、少なくともビット誤り率の増加をもたらす、あるいはパルスの識別を不可能にすることさえある。偏波モード分散は、内部複屈折（例えば、ファイバコア構造の不規則性）または外的要因により誘発された複屈折（例えば、曲げ、絞り等）によるものである。大規模なシングルモードファイバでは、ランダムに変化する場所において、例えば、温度のような環境変化によりランダムに変動する強度で偏波モード結合が発生するため、偏波モード分散そのものが時間とともに変化する。主偏波状態間の瞬時の群遅延時間差がマクスウェルの確率分布関数に従うことは周知である。マクスウェル分布する瞬時の群遅延時間差の平均値は、ファイバの平均群遅延時間差または偏波モード分散値（PMD）として知られている。強い偏波モード結合を持つ大規模なシングルモードファイバの偏波モード分散値は、ファイバ長の平方根に比例する。

【0003】

偏波モード分散による信号の歪みを緩和するために、ファイバに近い量の逆符号の群遅延時間差をもたらす光学素子をファイバの終端に設置してもよい。大規模な光ファイバにおける瞬時の群遅延時間差および主偏波状態のランダムな性質のため、偏波モード分散を補償するために用いられる光学素子を、一時的なファイバ状態に対して適応的に合わせなければならない。したがって、閉ループ設計の偏波モード分散補償器は、図1に示すように

1. 適応調整可能な光学素子（適応光学系）
 2. 歪みアナライザ
 3. 制御ロジック
- からなる。

【0004】

図1において、歪みアナライザ12は、光ファイバの一時的な偏波モード分散状態に最も良く一致するように適応光学系11を適応的に調整するために、制御ロジック13に対して信号歪みの指標を提供する。

【0005】

例えば、スペクトルホールバーニング（SHB）、直接アイオープニング解析等のような方法に加えて、偏光度（DOP）を偏波モード分散による信号歪みの解析に用いることができる。当業者にとって、スペクトル幅に反比例するコヒーレンス長が群遅延時間差のオーダーであれば、光ビームが劣化することは周知である。群遅延時間差がコヒーレンス長に比べて大きくなればなるほど、ビームはより大きく劣化し、その偏光度はより大きく減少する。このような周知の物理的効果はそのまま、偏波モード分散補償器の光学素子を適応的に制御するフィードバック信号として用いることができる。ファイバの異方性による光信号の偏波を信号スペクトル（帯域幅、形状）、群遅延時間差、および入力偏波状態の関数として導出する方法は、以下の文献に示されている。

"Degree of Polarization in Anisotropic Single-Mode Optical Fibers: Theory", Jun- 50

ichi Sakai, Susumu Machida, Tatsuya Kimura, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-18, No. 4, pp. 488-495, 1982

スペクトルホールバーニング、アイオープニングの直接計測、あるいはビット誤り率検出に比べて、偏光度を適応偏波モード分散補償器のフィードバック信号として用いる方法の利点は、次の通りである。

1. ビットレートに無関係
2. 任意の変調方式に対して変更することなく適用可能
3. 偏光度は偏波モード分散のみによる信号歪みの良好な指標を提供するという具合に、波長分散の影響を受けない

図2は、非ゼロ復帰(NRZ)方式にて48 Gbit/sのビットレートで変調された伝送信号の偏光度およびQペナルティを、瞬時の群遅延時間差の関数として示している。ここで、Qペナルティは次のように定義される。

【0006】

【数1】

$$Q \text{ ペナルティ} = 20 \cdot \log \frac{\text{Eye - opening of received signal}}{\text{Back - to - back eye - opening}} \quad (1)$$

【0007】

図2では、参考のため、24 GHz (ビットレートの半分) のスペクトル成分のパワーも瞬時の群遅延時間差の関数として示されている。ビットレートの半分のスペクトル成分は、瞬時の群遅延時間差に対して最も強い依存性を示すことが判明している。

【0008】

瞬時の群遅延時間差がなくなったときに唯一の極大値を取る偏光度とは反対に、24 GHz のスペクトル成分は周期的な振る舞いを示している。したがって、瞬時の群遅延時間差がビット持続時間を超えると予想される場合には、曖昧さを避けるために、少なくとももう1つのスペクトル成分、すなわち12 GHz (ビットレートの4分の1) を付加的にテストしなければならない。

【0009】

小さな群遅延時間差の値に対する偏光度と、24 GHz (ビットレートの半分)、12 GHz (ビットレートの4分の1)、および6 GHz (ビットレートの8分の1) のスペクトル成分のパワーの詳細を図3に示す。

【0010】

適応偏波モード分散補償器のフィードバック信号として偏光度を適用する方法において、偏光度を計測できる精度(特に、計測された偏光度の入力偏波状態に関する分散)が決定的に重要となる。

【0011】

図2から分かるように、例えば、Qペナルティが0.5 dBを超えてはならない場合、偏光度のダイナミックレンジは±5%となる。したがって、偏光度計測時の不確定性は5%を超えてはならない。偏波モード分散補償器の適応制御アルゴリズムは、ランダムに変化する群遅延時間差および主偏波状態を追跡するための最適点の環境で偏光度をサンプリングする必要がある。光ファイバ内の偏波モード分散状態に対して光学素子をわずかにずらすことにより要求されたサンプリングを行うため、偏光度を計測できる要求精度はさらに厳しくなる。

【0012】

要求精度を実現するための一般的なアプローチは、歪みアナライザ内の偏光計の光学部品を機械的に高精度で所定の角度に揃えることである。しかしながら、これは非常に冗漫な、したがってコスト集中的な構築方法である。

【発明の開示】

【0013】

本発明の課題は、冗漫でコスト集中的な構築方法を必要としないような、偏光度に基づく

偏波モード分散補償器を提供することである。

本発明による偏波モード分散補償器は、光学部、歪みアナライザ、および制御部を備える。光学部は入力光信号を受け取り、出力光信号を出力する。歪みアナライザは偏光計を含み、その偏光計の偏波特性を用いることで、出力光信号を解析して出力光信号の偏光度を表すフィードバック信号を生成する。この偏波特性は、偏光計から出力される複数の強度信号を用いたキャリブレーションにより決定される。制御部は、そのフィードバック信号に基づいて、光学部を調整する制御信号を生成する。

【0014】

光学部は適応光学系に対応し、1つ以上の光学素子を含む。制御部は、偏光度をフィードバック信号として用いて光学部を制御する制御ロジックに対応する。偏光計の偏波特性は、あらかじめ実際の偏光計に一致するようにキャリブレーションにより決定される。歪みアナライザは、光学部からの出力光信号を解析して、上記得られた偏波特性を用いることでフィードバック信号を生成し、それを制御部に出力する。偏光計が完全に組み立てられた後で偏波特性が計測されるため、機械的位置合わせ精度の要件は劇的に緩和される。冗漫で高精度の機械的位置合わせはもはや不要となり、劇的なコスト削減がもたらされる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0015】

以下、図面を参照しながら、本発明の好ましい実施形態を詳細に説明する。

光の物理的特性として、偏光度が、偏波モード分散補償器の適応光学系を調整するフィードバック信号を供給するために用いられる。

【0016】

偏光度を計測するために、入射光ビームを4つ以上のビームに分岐させ、各ビームが独立して配置された位相遅延および偏光光学系を通過するようにする。この種の偏光計測システムは、振幅分割型偏光計と呼ぶことができる。各ビームが進む経路の偏波特性が分かっている場合、その場合に限って、これらのビームの強度から偏波状態および偏光度を計算することができる。このような機器により偏波状態および偏光度を計測できる精度は、各経路の偏波特性、特に、例えば、偏光子の角度、経路の位相遅延等が分かる精度に強く依存する。以下では、各分岐ビームの偏波特性を高い精度で計測するための有利な解決方法を説明する。

【0017】

図4は、偏光度および／または偏波状態を計測する歪みアナライザの構成例を示している。偏光計21は、光ビームをいくつかのビームに分岐させ、それらのビームの強度信号を出力する。この強度信号は、増幅器22により増幅され、デジタル／アナログ(A/D)変換器23によりデジタル信号に変換される。中央処理装置(CPU)24は、そのデジタル信号の値を用いて偏光度および／または偏波状態を計算し、得られた結果をフィードバック信号として出力する。

【0018】

次に、偏光度をフィードバック信号として適応偏波モード分散補償器に適用する様々な方法について説明する。以下に説明する方法は、偏光度計測精度に関して有利な偏光計の構築例を含んでいる。光学部品をいかに正確に揃えるかに関する厳しい要件を緩和するために、偏光計のいくつかの適切な構築例を含むキャリブレーション方法を説明する。

【0019】

上述したように、振幅分割型偏光計は、入射光ビームをいくつかのビームに分岐させる偏光計である。各ビームは、個別に偏光子(検光子)および位相遅延器のような光学部品を通して誘導される。計測された強度から偏波状態を計算することができる。

【0020】

振幅分割型偏光計は、図5に示すように変調することができる。

入射光ビーム \vec{S}

10

20

30

40

50

【0021】

はビームスプリッタ31により4つのビーム（4つより多くのビームでも可、4つのビームを選択したのは説明を明確にするため）に分岐される。各分岐ビームは位相遅延器32および偏光子33の組み合わせを通して伝搬し、それぞれのビームの強度 I_0 、 I_1 、 I_2 、および I_3 はフォトダイオード34により検出される。位相遅延器／偏光子の組み合わせは楕円偏光子を表し、方位角 θ 、楕円率 ε 、および消光比 ER により特徴付けられる。消光比は、可能なすべての入力偏波状態に対する最小伝送強度 τ_{min} および最大伝送強度 τ_{max} の間の関係である。各ビームが入力側からビームスプリッタ31を通して伝搬し、偏光子33に到達するまでの間に各ビームに影響を及ぼす偏波特性は、位相遅延器／偏光子のそれぞれの組み合わせによりこのモデルに組み入れられる。

10

【0022】

検出された強度 I_0 、 I_1 、 I_2 、および I_3 と、ビームスプリッタ31の入力側における光の偏波

(ストークスベクトル \vec{S})

【0023】

との間の関係は、次のように表される。

【0024】

【数2】

20

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = Z \cdot \vec{S}, \quad (2)$$

【0025】

【数3】

$$Z = \begin{pmatrix} \tau_{a0} & \tau_{d0} \cos 2\theta_0 \cos 2\varepsilon_0 & \tau_{d0} \sin 2\theta_0 \cos 2\varepsilon_0 & \tau_{d0} \sin 2\varepsilon_0 \\ \tau_{a1} & \tau_{d1} \cos 2\theta_1 \cos 2\varepsilon_1 & \tau_{d1} \sin 2\theta_1 \cos 2\varepsilon_1 & \tau_{d1} \sin 2\varepsilon_1 \\ \tau_{a2} & \tau_{d2} \cos 2\theta_2 \cos 2\varepsilon_2 & \tau_{d2} \sin 2\theta_2 \cos 2\varepsilon_2 & \tau_{d2} \sin 2\varepsilon_2 \\ \tau_{a3} & \tau_{d3} \cos 2\theta_3 \cos 2\varepsilon_3 & \tau_{d3} \sin 2\theta_3 \cos 2\varepsilon_3 & \tau_{d3} \sin 2\varepsilon_3 \end{pmatrix}$$

30

【0026】

角度 θ_0 、 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 および ε_0 、 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 は、位相遅延器／偏光子の各組み合わせの楕円位相遅延特性を表している。係数 τ_{a0} 、 τ_{a1} 、 τ_{a2} 、 τ_{a3} および τ_{d0} 、 τ_{d1} 、 τ_{d2} 、 τ_{d3} は、次式により、可能なすべての入力偏波状態に対する最小伝送強度（伝送係数） τ_{min} および最大伝送強度 τ_{max} に関係付けられる。

$$\tau_a = (\tau_{max} + \tau_{min}) / 2, \quad (3)$$

40

$$\tau_d = (\tau_{max} - \tau_{min}) / 2 \quad (4)$$

インストルメント行列 Z の各行は、ストークスベクトルと同様の方式で、方位角 θ および楕円率 ε により偏波状態を記述していると考えることができる。結果として、各ビームが通過する位相遅延器／偏光子の組み合わせは、図6に示すようにポアンカレ球上の1つの点により表すことができる。各ビームに影響を及ぼす偏波特性のポアンカレ球における表現は、等価検光子偏波と呼ぶことができる。

【0027】

図示された等価検光子偏波 A_0 、 A_1 、 A_2 、および A_3 の例は、振幅分割型偏光計の状況を示しており、楕円位相遅延器（等価検光子）のパラメータは図7のようになる。

それぞれの等価検光子偏波および消光比が分かっている場合、振幅分割偏光計はその偏波

50

特性に関して完全に特徴付けられる。インストルメント行列 Z は計算することができ、偏光計の入力側における

ストークスベクトル \vec{S}

【0028】

は、フォトダイオード 34 で検出された強度 I_0 、 I_1 、 I_2 、および I_3 から計算することができる。

従来の手順では、最初に等価検光子偏波の値を選択し、次に光学部品の機械的位置合わせがあらかじめ選択されたインストルメント行列に一致するように光学部品を組み立てる。要求精度に応じて、位置合わせは非常に正確でなければならない。このため、冗漫でコスト集中的な組み立て作業となる。

10

【0029】

別のアプローチでは、以下に概説するように、それぞれの等価検光子偏波および消光比を高い精度で計測する手順を提供する。したがって、光学部品は、位置合わせ精度に関する緩和された要件の下で組み立てられる。これにより、性能改善と同時に、組み立て作業のコスト削減がもたらされる。

【0030】

図 8 は、振幅分割型偏光計の自律キャリブレーションのための配置を示している。キャリブレーション手順は、複数の異なる入力偏波状態に対する一組の強度ベクトル I_0 、 I_1 、 I_2 、および I_3 を計測することにより開始される。異なる入力偏波は、無視できる、または少なくとも非常に小さな偏差で、完全偏光 ($DOP = 100\%$) を偏波変換器 42 に出射する狭帯域レーザ 41 により提供される。

20

【0031】

自走の、あるいは外部信号により制御された偏波変換器 42 は、ポアンカレ球が完全にカバーされるように、複数の偏波状態を較正対象の振幅分割偏光計 43 に出射する。

このようにして入力偏波状態が変調されている場合、4つの強度信号のうちの任意の2つのパラメトリックプロットは、図 9 に示すように、必ず楕円で囲まれた平面上の複数の点となる。楕円の左、右、下、および上の境界は、それぞれの検光子の最小伝送係数 τ_{min} および最大伝送係数 τ_{max} に一致する。

30

【0032】

図 10 に示すように、1 辺の長さを 1 とする正方形内に楕円が納まるように強度信号をスケール変更すると、楕円率 ε は、ポアンカレ球表現において、パラメトリックプロットが描画されている 2 つの等価検光子の間の角度間隔 ε_{01} の半分となる。以下の文献には、全ファイバ光学インラインおよびオフライン偏波検光子が示されており、被試験デバイスをインライン偏光計とオフライン偏光計の間に置いてその偏波伝達関数を特徴付ける配置の応用について記述されている。計測可能なパラメータは、偏波依存性損失、位相遅延、群遅延時間差、および減偏光である。さらに、ファイバ光学パラメトリックセンサ、特に温度センサの応用も含まれている。とりわけ、振幅分割型偏光計の強度ベクトルの特性に関する数学については、46 乃至 51 ページに記述されている。

40

"Selbstkalibrierender faseroptischer Polarisationsanalysator", Jens C. Rasmussen, Ph.D thesis, RWTH Aachen (Germany), Shaker Verlag, ISBN 3-8265-4450-1, 1998

等価検光子偏波間の相対角距離 ε_{01} 、 ε_{02} 、 ε_{03} 、 ε_{12} 、および ε_{13} 、が分かった後、絶対偏波は以下のように導出される。

【0033】

偏光度計測は、偏光度を計測するための基準座標系の回転（可能な両方向におけるポアンカレ球の回転）に対して不変である。偏光度計測そのものに対してさえ、光ファイバを通して光が伝搬する間には内部および外的誘導複屈折のために、基準座標系の回転は必ず発生する。したがって、ここでのように、光ファイバを通過した光の偏波を計測する場合に、基準座標系の絶対的な向きは重要ではない。

50

【0034】

したがって、第1の等価検光子偏波A0は、図11に示すように、ポアンカレ球上の任意の位置に置くことができる。ここでは、(方位角, 楕円率) = (0, 0)に固定している。

【0035】

第2の等価検光子偏波A1は、ポアンカレ球上で第1の等価検光子偏波A0から角距離 ε_{01} の位置に置かれる。したがって、候補場所は、第1の等価検光子偏波A0の周りの円となる。前述した回転不変性により、図12に示すように、候補場所の円とポアンカレ球の赤道との交点を選択される。

【0036】

第3の等価検光子偏波A2は、ポアンカレ球上で第1の等価検光子偏波A0から角距離 ε_{02} であり、かつ、第2の等価検光子偏波A1から角距離 ε_{12} の位置に置かれる。したがって、候補場所は、第1および第2の等価検光子偏波A0およびA1の周りの円の2つの交点となる。第3の等価検光子偏波A2に対するこれらの2つの候補場所から、図13に示すように、1つが選択される。

【0037】

第4の等価検光子偏波A3は、ポアンカレ球上で第1の等価検光子偏波A0から角距離 ε_{03} であり、第2の等価検光子偏波A1から角距離 ε_{13} であり、かつ、第3の等価検光子偏波A2から角距離 ε_{23} の位置に置かれる。したがって、候補場所は、第1、第2、および第3の等価検光子偏波A0、A1、およびA2の周りの円の2つの交点となる。第4の等

【0038】

次に、キャリブレーション手順を導出するために用いられる数学について示す。振幅分割型偏光計の各検光子は、任意の共通基準平面に関して楕円偏光子により記述することができる。第nの検光子により検出される強度 I_n ($n=0, 1, 2, 3$)は、次のようになる。

$$I_n = \tau_{an} + \tau_{dn} (\cos 2\theta_n \cos 2\varepsilon_n S_1 + \sin 2\theta_n \cos 2\varepsilon_n S_2 + \sin 2\varepsilon_n S_3) \quad (5)$$

基準平面内の偏波は、ストークスパラメータ S_0, S_1, S_2 、および S_3 により記述される。第nの検光子の等価検光子偏波は、方位角 θ_n および楕円率 ε_n により特徴付けられる。因子 τ_{an} および τ_{dn} は、伝送係数 $\tau_{\max} = I_{\max}$ および $\tau_{\min} = I_{\min}$ から計算できる。

$$\tau_{an} = (\tau_{\max} + \tau_{\min}) / 2, \quad (6)$$

$$\tau_{dn} = (\tau_{\max} - \tau_{\min}) / 2 \quad (7)$$

強度 I_0, I_1 、および I_2 を検出する3つの検光子に注目すると、次式が得られる。

【0039】

【数4】

$$\vec{I}' = \mathbf{Z}' \cdot \vec{S}', \quad (8)$$

【0040】

【数5】

$$\vec{I}' = \begin{pmatrix} I_0 - \tau_{a0} \\ I_1 - \tau_{a1} \\ I_2 - \tau_{a2} \end{pmatrix}, \quad \vec{S}' = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix},$$

10

20

30

40

50

【 0 0 4 1 】

【 数 6 】

$$Z' = \begin{pmatrix} \tau_{d0} \cos 2\theta_0 \cos 2\varepsilon_0 & \tau_{d0} \sin 2\theta_0 \cos 2\varepsilon_0 & \tau_{d0} \sin 2\varepsilon_0 \\ \tau_{d1} \cos 2\theta_1 \cos 2\varepsilon_1 & \tau_{d1} \sin 2\theta_1 \cos 2\varepsilon_1 & \tau_{d1} \sin 2\varepsilon_1 \\ \tau_{d2} \cos 2\theta_2 \cos 2\varepsilon_2 & \tau_{d2} \sin 2\theta_2 \cos 2\varepsilon_2 & \tau_{d2} \sin 2\varepsilon_2 \end{pmatrix}$$

【 0 0 4 2 】

一定偏光度 $p = (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{1/2}$ を仮定すると、

$$\text{ベクトル } \vec{S}' = (S_1, S_2, S_3)^T$$

10

【 0 0 4 3 】

により記述される各偏波状態は、次式を満たす。

【 0 0 4 4 】

【 数 7 】

$$\vec{S}'^T \cdot E \cdot \vec{S}' = p^2, \quad (9)$$

20

E : 単位行列

【 0 0 4 5 】

この式は、

$$\vec{S}'$$

【 0 0 4 6 】

のベクトル成分を変数とする半径 p の球を記述している。(8) 式および (9) 式を組み
合わせると、次式が得られる。

30

【 0 0 4 7 】

【 数 8 】

$$p^2 = \vec{S}'^T \cdot E \cdot \vec{S}' \quad (10)$$

$$= (Z'^{-1} \cdot \vec{I}')^T \cdot E \cdot Z'^{-1} \cdot \vec{I}' \quad (11)$$

$$= \frac{1}{\det(Z')} (Z'^T \cdot \vec{I}')^T \cdot E \cdot \frac{1}{\det(Z')} Z'^T \cdot \vec{I}' \quad (12)$$

$$\Rightarrow \vec{I}'^T \cdot Z' \cdot E \cdot Z'^T \cdot \vec{I}' = p^2 (\det(Z'))^2 \quad (13)$$

40

【 0 0 4 8 】

得られた式は、3次元のベクトルの成分を変数とする2次平面を記述している。さらなる分類も可能である。対称行列 $Z' \cdot E \cdot Z'^T$ のすべての固有値は正の実数である。 $p^2 (\det(Z'))^2$ の項も常に正である。したがって、(13) 式は、行列 Z' の正則性とそのすべての列ベクトルが線形独立であるという仮定の下で、楕円体を記述している。物理的な意味は、すべての検光子が偏光子 ($\tau_{dn} > 0$) であり、等価検光子偏波同士は同等ではないということである。

強度ベクトル \vec{I}'

【0049】

の成分を正規化すると、次のベクトルは、すべての辺の長さが1に等しい立方体に内接する楕円体を記述している。

【0050】

【数9】

$$\vec{I}'' = \begin{pmatrix} 1/(\tau_{\max 0} - \tau_{\min 0}) & 0 & 0 \\ 0 & 1/(\tau_{\max 1} - \tau_{\min 1}) & 0 \\ 0 & 0 & 1/(\tau_{\max 2} - \tau_{\min 2}) \end{pmatrix} \cdot \vec{I}' \quad (14)$$

【0051】

今度は、

強度ベクトル \vec{I}''

【0052】

の各成分の値の候補が $-0.5 < I_n'' < 0.5$ に限定される。基準平面内の偏波が等価検光子偏波に等しければ、第1の検光子は最大強度 $I_0'' = 0.5$ を検出する。第1の検光子に対する検出強度 I_0'' は、次のようになる。

【0053】

【数10】

$$\begin{cases} S_1 = \cos 2\theta_1 \cos 2\varepsilon_1 \\ S_2 = \cos 2\theta_1 \cos 2\varepsilon_1 \\ S_3 = \sin 2\varepsilon_1 \end{cases} \quad \text{に対して} \quad I_0'' = 0.5 \quad \text{すなわち最大}$$

(15)

【0054】

第2の検光子は、第1の検光子が最大強度を検出するのと同じ偏波において、次式の強度 I_1'' を検出する。

$$2I_1'' \quad (I_0'' = 0.5) = \cos 2\theta_0 \cos 2\varepsilon_0 \cos 2\theta_1 \cos 2\varepsilon_1 + \sin 2\theta_0 \cos 2\varepsilon_0 \sin 2\theta_1 \cos 2\varepsilon_1 + \sin 2\varepsilon_0 \sin 2\varepsilon_1 \quad (16)$$

次式より、(16)式の右辺は、第1および第2の検光子の

等価検光子偏波 \vec{P}_{Ana0} および \vec{P}_{Ana1} 間の角度 $\angle \vec{P}_{\text{Ana0}} \vec{P}_{\text{Ana1}}$

【0055】

の余弦に等しい。

【0056】

【数11】

$$\cos(\angle \vec{P}_{\text{Ana0}} \vec{P}_{\text{Ana1}}) = \frac{\vec{P}_{\text{Ana0}} \cdot \vec{P}_{\text{Ana1}}}{|\vec{P}_{\text{Ana0}}| \cdot |\vec{P}_{\text{Ana1}}|} \quad (17)$$

【0057】

ベクトル \vec{I}''

【0058】

からなる楕円体の座標平面 I_0'' 、 I_1'' 上への直交射影は、楕円形状の平面となる。その楕円形状平面の主軸 a および b の長さ、楕円率 ε 、および値 I_1'' ($I_0''_{\max}$) に対して、以下の関係が当てはまる。

【0059】

【数12】

$$\tan \varepsilon = \frac{b}{a}, \quad (18) \quad 10$$

$$\cos \delta = 2 I_1'' (I_0''_{\max}), \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} a^2 + b^2 &= \frac{1}{2} \\ \pm ab &= \frac{1}{4} \sin \delta \end{aligned} \right\} \text{アポロニオスのレンマ} \quad (20)$$

【0060】

これより、

20

等価検光子偏波 $\vec{P}_{\text{Ana}0}$ 、 $\vec{P}_{\text{Ana}1}$

【0061】

間の角度と楕円率 ε の関係を導出することができる。(18) - (20) 式より、次式が得られる。

【0062】

【数13】

$$\frac{2ab}{a^2 + b^2} = \pm \sin \delta \quad 30$$

$$= \frac{2 \tan \varepsilon}{1 + \tan^2 \varepsilon}$$

$$= \sin 2\varepsilon \quad 40$$

$$\Rightarrow \delta = \pm 2\varepsilon \quad (21)$$

【0063】

(16)、(17)、および(19)式から、2つの等価検光子偏波 $\vec{P}_{\text{Ana}0}$ 、 $\vec{P}_{\text{Ana}1}$ 間の角度 $\angle \vec{P}_{\text{Ana}0} \vec{P}_{\text{Ana}1}$

【0064】

50

と楕円率 ε_{nm} の関係は、次のように計算される。

【0065】

【数14】

$$\begin{aligned} \cos(\angle \vec{P}_{Anan} \vec{P}_{Anam}) &= 2 I''_m (I''_{max}) \\ &= \cos \delta_{nm} = \cos 2\varepsilon_{nm} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\Rightarrow \angle \vec{P}_{Anan} \vec{P}_{Anam} = 2\varepsilon_{nm} \quad (23)$$

【0066】

この関係は、検光子の可能な各組に対して当てはまる。

10

次に、偏光度の原理的な計測精度に関して、振幅分割型偏光計の3つの構成と可能な変形例について説明する。これらの構成は、“直交”、“正方”、および“ダイヤモンド”と命名される。これらは、使用される光学部品の数と配置において異なっている。“直交”スキームは、以下の文献で用いられている。

“A study for wavelength dependency of Polarization Analysis Module”, T. Miyakoshi, S. Shikii, Y. Hotta, S. Boku, Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, sougou taikai B-10-95, p.528, 2001

この文献では、3つのビームスプリッタ、4つの偏光子、1つの1/4波長位相遅延器、4つのフォトダイオード、およびデータ取得電子機器からなる振幅分割型偏光計が記述されている。

20

【0067】

“正方”は、複雑さと実現可能な精度の間の妥協案である。“ダイヤモンド”は、DOP精度およびノイズ感度に関して理想的な構成であるが、最も複雑な配置を必要とする。特定の配置の主要性能を比較するために、計測された光強度とストークスベクトルの間の関係を記述する4×4インストルメント行列の条件数を用いることができる。“直交”、“正方”、および“ダイヤモンド”のスキームの条件数(Hadamardに従って計算される)は、それぞれ、2.0、1.5、および1.3である。

【0068】

主DOP精度の角度不整合に対する依存性を数値的に評価するために、実際の偏光子の角度と想定された偏光子の角度の差は、0°、0.1°、0.5°、1°の値を通して2°まで変化させた。それらの値は選択的に4つの偏光子の角度と加算および減算されたが、これは近似的に最悪の場合と考えることができる。

30

【0069】

ノイズをさらに考慮するため、フォトダイオード電流のA/D変換による数量化ノイズを主要な発生源と仮定する。A/D変換の分解能は、8、10、12、14ビットの値を通して16ビットまで変化させた。

【0070】

フォトダイオードの暗電流および増幅器によるオフセットはゼロと仮定する。信号はA/D変換のダイナミックレンジを完全にカバーするものと仮定する。偏光子の消光比は恣意的に高く仮定する。統合された位相遅延は固定されているものと仮定する。

40

【0071】

振幅分割型偏光計の“直交”型構成を図14に示す。この偏光計の基本構成は、3つのビームスプリッタ51、52、および53と、4つの偏光子54、55、56、および57と、波長の4分の1の位相遅延を有する1つの位相遅延器58とを含む。偏光子54および57の角度は0°であり、偏光子55および56の角度はそれぞれ45°および-45°である。図15に示すように、等価検光子偏波(A0, A1, A2, A3)がポアンカレ球上で相互に直交するように部品が配置される。主DOP精度[%]のノイズ(A/D分解能[bit])および角度不確定性[°]に対する依存性は、具体的な値について図16に示されている。

【0072】

50

“直交”型偏光計の変形例の構成を図17に示す。この偏光計は、3つのビームスプリッタ61、62、および63と、4つの偏光子64、65、66、および67と、波長の4分の1の位相遅延を有する1つの位相遅延器68とを含む。偏光子64および65の角度は 0° であり、偏光子66および67の角度はそれぞれ 45° および -45° である。

【0073】

振幅分割型偏光計の“正方”型構成を図18に示す。この偏光計の基本構成は、3つのビームスプリッタ71、72、および73と、4つの偏光子74、75、76、および77と、波長の4分の1の位相遅延を有する1つの位相遅延器78とを含む。偏光子74および77の角度は 0° であり、偏光子75および76の角度はそれぞれ 60° および -60° である。図19に示すように、ポアンカレ球上の等価検光子偏波(A0, A1, A2, A3)の角度間隔が 120° となるように部品が配置される。A3は、他のすべての等価検光子偏波に対して直交している。主DOP精度のノイズおよび角度不確定性に対する依存性は、具体的な値について図20に示されている。

【0074】

“正方”型偏光計の変形例の構成を図21に示す。この偏光計は、3つのビームスプリッタ81、82、および83と、4つの偏光子84、85、86、および87と、波長の4分の1の位相遅延を有する1つの位相遅延器88とを含む。偏光子84および85の角度は 0° であり、偏光子86および87の角度はそれぞれ 60° および -60° である。

【0075】

振幅分割型偏光計の“ダイヤモンド”型構成を図22に示す。この偏光計の基本構成は、3つのビームスプリッタ91、92、および93と、4つの偏光子94、95、96、および97と、4つの位相遅延器98、99、100、および101とを含む。偏光子94および97の角度は 0° であり、偏光子95および96の角度はそれぞれ 60° および -60° である。位相遅延器98、99、および100の位相遅延は波長の 18.48 分の1であり、位相遅延器101のそれは波長の4分の1である。図23に示すように、等価検光子偏波(A0, A1, A2, A3)がポアンカレ球上でダイヤモンドの複数の原子のような構造を形成するように部品が配置される。主DOP精度のノイズおよび角度不確定性に対する依存性は、具体的な値について図24に示されている。

【0076】

“ダイヤモンド”型偏光計の変形例の構成を図25に示す。この偏光計は、3つのビームスプリッタ111、112、および113と、4つの偏光子114、115、116、および117と、4つの位相遅延器118、119、120、および121とを含む。偏光子114および115の角度は 0° であり、偏光子116および117の角度はそれぞれ 60° および -60° である。位相遅延器118の位相遅延は波長の4分の1であり、位相遅延器119、120、および121のそれは波長の 18.48 分の1である。

【0077】

図26は、“ダイヤモンド”型偏光計の別の変形例の構成を示している。この偏光計は、3つのビームスプリッタ131、132、および133と、4つの偏光子134、135、136、および137と、2つの位相遅延器138および139とを含む。偏光子134および135の角度は 0° であり、偏光子136および137の角度はそれぞれ 60° および -60° である。位相遅延器138の位相遅延は波長の4分の1から 18.48 分の1を差し引いた値であり、位相遅延器139のそれは波長の 18.48 分の1である。

【0078】

上述した構成において、偏光子の角度および位相遅延器の位相遅延はそれぞれの理論値自身に限定されるわけではなく、その値に対する所与の許容誤差範囲(例えば、 $\pm 5\%$)内にとることができる。

【0079】

自律キャリブレーション手順は、実現が容易な偏光度一定の光源に加えて、一定の入力パワーを必要とする。これは、結晶ベースまたはファイバベースの装置のような、偏波に対する挿入損失の依存性が低い偏波変調のための偏波変換器を用いることで実現される。多

10

20

30

40

50

段の可変複屈折波長板または集積光学部品のように、偏波に対する挿入損失の依存性が許容できないほど高い偏波変換器を用いた場合、キャリブレーション対象の偏光計の強度と同時に光波のパワーを計測しなければならない。

【0080】

同時パワー計測は1×2カプラにより実現でき、一方のアームはパワーモニタリング用に用いられ、もう一方はキャリブレーション対象の偏光計用に用いられる。

もう1つの選択肢は、図27に示すように、3つの偏光子のみを用い、4つの光ビームのうちの1つをパワーモニタリング用に用いた振幅分割型偏光計を実現することである。図27の構成は、図17の構成から偏光子67を除くことにより得られる。

【0081】

別の実現可能性は図28に示されており、光ビームが5つのビームに分岐される。図28の構成は、図26の構成に追加のビームスプリッタ140を挿入することにより得られる。それらのビームのうち4つは上述したように光学系を通して伝送され、ビームスプリッタ140からの5番目のビームは、パワーモニタリング用に用いられる。

【0082】

歪みモニタとしての振幅分割型偏光計の偏波モード分散補償器への応用においては、説明した変形例の1つを用いることができ、偏光度計測に対する要求精度は、説明したキャリブレーション手順（インストルメント行列Zの計測）が適用された後で実現される。偏波モード分散補償器の適応光学系を調整する基本アルゴリズムは、最大偏光度を保証する勾配探索アルゴリズムにより実現される。

【0083】

偏波モード分散補償器の適応光学系を制御可能な速度を改善するため、および／または、偏光度と偏波モード分散による信号歪みの間における訂正の曖昧さを避けるために、以下では他の変形例について説明する。

【0084】

最大偏光度を追跡することにより偏波モード分散補償器を適応的に制御することが可能であるが、計測された偏波状態を含めることで、主要な実現可能追跡速度を改善することができると思われる。一般に、計測された偏波状態は、光ファイバの偏波伝達関数の変化に対して非常に敏感であるが、偏光度は、計測精度がたとえ1%またはそれより良くても、制限された計測精度でカバーできる中程度の感度を示すのみである。

【0085】

図29に示すように、偏光度に加えて偏波状態をモニタすることにより、比較的高度なアルゴリズムの可能性が生じる。図29の偏波モード分散補償器は、適応光学系141、歪みアナライザ142、および制御ロジック143を含んでいる。歪みアナライザ142は、信号歪みの指標としての偏光度に加えて偏波状態をフィードバック信号として制御ロジック143に供給する。制御ロジック143は、そのフィードバック信号を受け取り、受け取った信号に基づいて適応光学系141のための制御信号を生成する。

【0086】

偏波状態が小さな変化しか示さない限り、光伝送システムの偏波モード分散特性もまたわずかに変化するだけであり、この間は適応光学系141の再調整は不要である。このアイドル期間は、偏波変換器の部品をその主要動作点に再調整する、または巻き戻すというような他の動作を行うために、有利に用いることができる。

【0087】

偏波状態が変化する場合には、光伝送システムの偏波モード分散特性が変化してしまい、適応光学系141の再調整が必要となる。偏波状態が変化した際の角度変化および速度は、適応光学系141の状態をどれだけ大きく再調整しなければならないかの指標として用いることができる。

【0088】

曖昧さ、つまり最大偏光度が最小信号歪みに対応しない場合を避けるためには、図30に示すように、高速フィードバック信号としての偏光度と、例えば、前方誤り訂正の電子機

10

20

30

40

50

器により供給されるビット誤り率の組み合わせを、信号歪みの最終的な指標として用いることができる。図30の偏波モード分散補償器は、図29の構成に類似した構成を有する。歪みアナライザ142は、偏光度のみ、または偏光度と偏波状態の組み合わせを制御ロジック143に供給する。受信機144は、前方誤り訂正の電子機器を含んでおり、ビット誤り率をフィードバック信号として出力する。制御ロジック143は、歪みアナライザ142および受信機144からフィードバック信号を受け取り、受け取った信号に基づいて適応光学系141のための制御信号を生成する。

【0089】

光伝送システムの偏波モード分散特性の高速な変化に対して、偏光度計測により供給されるような高速フィードバック信号が必要となる一方で、微調整の目的には、受信機144
10における前方誤り訂正の電子機器により供給されるようなビット誤り率が用いられる。

【0090】

以上詳細に説明したように、本発明によれば、偏光計が組み立てられた後に偏波特性が計測されるので、偏光計に対する機械的位置合わせ精度の要件が劇的に緩和される。したがって、冗漫でコスト集中的な機械的位置合わせは不要となる。

【図面の簡単な説明】

【0091】

【図1】従来の偏波モード分散補償器の構成を示す図である。

【図2】瞬時の群遅延時間差の関数としての偏光度、Qペナルティ、およびスペクトル成分を示す図である。
20

【図3】瞬時の群遅延時間差の関数としての偏光度、Qペナルティ、およびスペクトル成分の詳細を示す図である。

【図4】歪みアナライザの構成を示す図である。

【図5】振幅分割型偏光計のモデルを示す図である。

【図6】ポアンカレ球における振幅分割型偏光計の偏波特性表現を示す図である。

【図7】楕円位相遅延器のパラメータを示す図である。

【図8】振幅分割型偏光計のキャリブレーションのための配置を示す図である。

【図9】2つの強度信号のパラメトリックプロットを示す図である。

【図10】2つの強度信号のスケール変更されたパラメトリックプロットを示す図である
30

【図11】ポアンカレ球上の第1の等価検光子偏波の場所を示す図である。

【図12】ポアンカレ球上の第2の等価検光子偏波の候補場所を表す円を示す図である。

【図13】ポアンカレ球上の第3の等価検光子偏波の候補場所を表す円の交点を示す図である。

【図14】振幅分割型偏光計の直交型構成を示す図である。

【図15】ポアンカレ球上の直交型構成の等価検光子偏波を示す図である。

【図16】直交型構成におけるDOP精度のノイズおよび角度不確定性に対する依存性を示す図である。

【図17】直交型偏光計の変形例の構成を示す図である。

【図18】振幅分割型偏光計の正方型構成を示す図である。
40

【図19】ポアンカレ球上の正方型構成の等価検光子偏波を示す図である。

【図20】正方型構成におけるDOP精度のノイズおよび角度不確定性に対する依存性を示す図である。

【図21】正方型偏光計の変形例の構成を示す図である。

【図22】振幅分割型偏光計のダイヤモンド型構成を示す図である。

【図23】ポアンカレ球上のダイヤモンド型構成の等価検光子偏波を示す図である。

【図24】ダイヤモンド型構成におけるDOP精度のノイズおよび角度不確定性に対する依存性を示す図である。

【図25】ダイヤモンド型偏光計の変形例の構成を示す図である。

【図26】ダイヤモンド型偏光計の別の変形例の構成を示す図である。
50

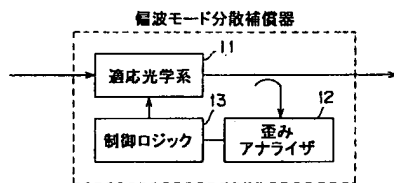
【図 27】自律キャリブレーションのための振幅分割型偏光計の変形例の構成を示す図である。

【図 28】自律キャリブレーションのための振幅分割型偏光計の別の変形例の構成を示す図である。

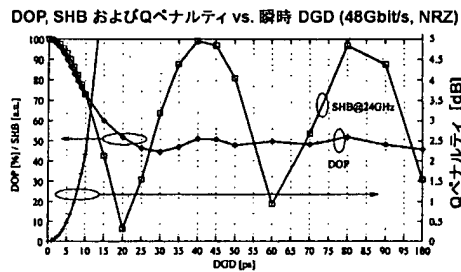
【図 29】偏光度および偏波状態をフィードバック信号として用いた偏波モード分散補償器を示す図である。

【図 30】偏光度および／または偏波状態とビット誤り率をフィードバック信号として用いた偏波モード分散補償器を示す図である。

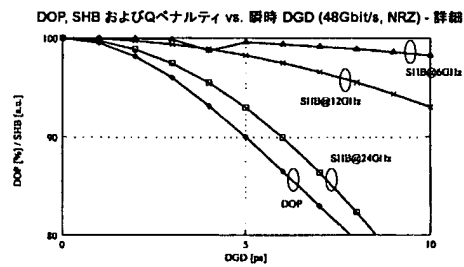
【図 1】



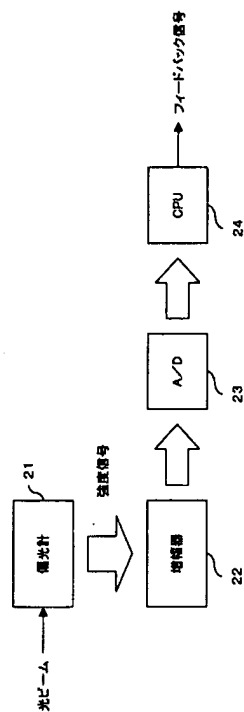
【図 2】



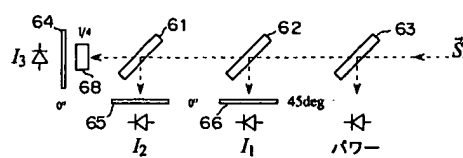
【図 3】



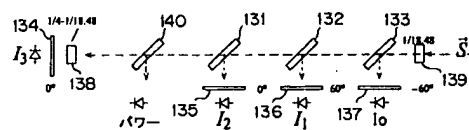
【 図 4 】



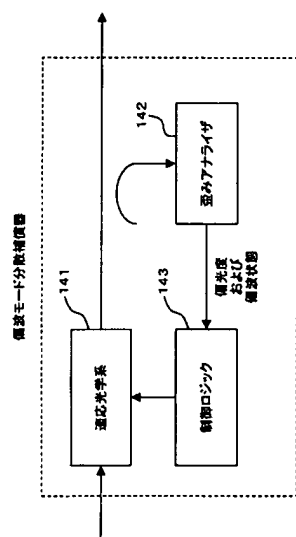
【图 27】



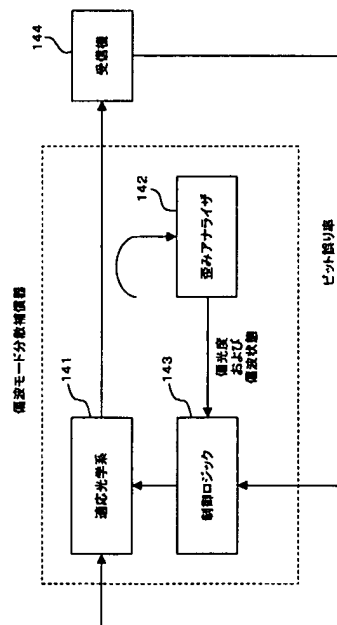
【圖 28】



【图 29】



【図 30】



【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

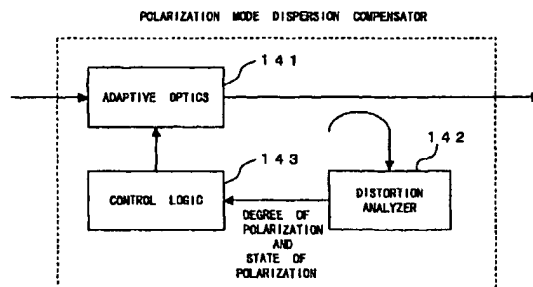
(19) World Intellectual Property Organization
International Bureau(43) International Publication Date
13 March 2003 (13.03.2003)

PCT

(10) International Publication Number
WO 03/021822 A1

- (51) International Patent Classification: H04B 10/18, G01J 4/00
- (31) International Application Number: PCT/JP01407568
- (32) International Filing Date: 31 August 2001 (31.08.2001)
- (25) Filing Language: English
- (26) Publication Language: English
- (71) Applicant (for all designated States except US): FUJITSU LIMITED (JP/JP); 1-1, Kamikodanaka 4-chome, Nakahara-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 211-8588 (JP).
- (72) Inventors; and
(73) Inventors/Applicants (for US only): RASMUSSEN, Jens, G. (DE/JP); c/o FUJITSU LIMITED, 1-1, Kamikodanaka 4-chome, Nakahara-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 211-8588 (JP); ISHIKAWA, George (JP/JP); c/o FUJITSU LIMITED, 1-1, Kamikodanaka 4-chome, Nakahara-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 211-8588 (JP); TERAHARA, Takafumi (JP/JP); c/o FUJITSU LIMITED, 1-1, Kamikodanaka 4-chome, Nakahara-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 211-8588 (JP); OOL, Hiroki (JP/JP); c/o FUJITSU LIMITED, 1-1, Kamikodanaka 4-chome, Nakahara-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 211-8588 (JP).
- (74) Agent: OSUGA, Yoshiyuki; 3rd Fl., Nihoncho Bldg., 8-20, Nihoncho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0084 (JP).
- (81) Designated States (national): CN, JP, US.
- (84) Designated States (regional): European patent (DE, FR, GB).
- Published:
— with international search report
- For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

(54) Title: POLARIZATION MODE DISPERSION COMPENSATOR BASED ON DEGREE OF POLARIZATION



(57) Abstract: The degree of polarization of an optical signal is measured by a polarimeter and used for providing a feedback signal to adjust adaptive optics of a polarization mode dispersion compensator. The polarization properties of the polarimeter are determined with high accuracy to match the polarimeter through calibration and used to produce the feedback signal.

WO 03/021822 A1

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

1

DESCRIPTION

POLARIZATION MODE DISPERSION COMPENSATOR BASED ON DEGREE
OF POLARIZATION

5

Technical Field

The present invention relates to a polarization mode dispersion compensator for analyzing signal distortion due to polarization mode dispersion in optical transmission systems and therefore providing a feedback signal to adjust adaptive optics used for mitigating polarization mode dispersion.

10

Background Art

The higher the bit rate of an optical transmission system, the more a specific amount of polarization mode dispersion of an optical fiber distorts the transmitted signal.

15

Due to polarization mode dispersion, the two modes in a so called single-mode fiber propagate with different velocities. An initial pulse splits its energy into the two modes. The two modes experience a differential delay during propagation. This leads to pulse spreading at the end of the fiber. The more the differential delay between the two modes is in the order of the bit duration,

20

25

the more neighboring pulses will overlap, which leads at least to an increasing bit-error rate or makes it even impossible to differentiate the pulses. Polarization mode dispersion is due to internal birefringence (e.g. fiber core geometry irregularities) or externally induced birefringence (e.g. bending, squeezing, etc.). Because in a long single-mode fiber, polarization mode coupling occurs at randomly varying locations with randomly fluctuating strength due to e.g. environmental changes like temperature, polarization mode dispersion itself varies over time. It is well known, that the instantaneous differential group delay between the principal states of polarization follows a Maxwellian probability density function. The mean of the Maxwellian distributed instantaneous differential group delay is known as the average differential group delay, or the polarization mode dispersion value (PMD) of the fiber. The polarization mode dispersion value is, for long single-mode fibers with high polarization mode coupling, proportional to the square root of the fiber length.

To mitigate signal distortion due to polarization mode dispersion, optical elements introducing a similar amount of differential group delay as in the fiber but with an opposite sign, can be placed at the end of the fiber. Due to the random nature of the instantaneous

differential group delay and the principal states of polarization in a long optical fiber, the optical elements used for compensating polarization mode dispersion must be adaptively adjusted to the momentary fiber conditions. A closed loop design, polarization mode dispersion compensator consequently consists of:

1. adaptively adjustable optical elements (adaptive optics)
2. distortion analyzer
- 10 3. control logic

as depicted in Fig. 1.

In Fig. 1, the distortion analyzer 12 provides a measure of signal distortion for the control logic 13 to adaptively adjust the adaptive optics 11, such that they best match the momentary polarization mode dispersion conditions of the optical fiber.

Beside methods like for example spectral hole burning (SHB), direct eye-opening analyzing, etc., the degree of polarization (DOP) can be used for analyzing signal distortion due to polarization mode dispersion. For those who are skilled in the art, it is well known that a light beam experiences depolarization if the coherence length, which is inversely proportional to the spectral width, is in the order of the differential group delay. The higher the differential group delay

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

4

becomes compared to the coherence length, the more the beam gets depolarized and its degree of polarization decreases. This well known physical effect is straightforward to be used as a feedback signal to
5 adaptively control optical elements of a polarization mode dispersion compensator. Derivation of the depolarization of an optical signal due to fiber anisotropies as a function of signal spectrum (bandwidth, form), differential group delay and state of input
10 polarization is shown in the following reference.

"Degree of Polarization in Anisotropic Single-Mode Optical Fibers: Theory", Jun-ichi Sakai, Susumu Machida, Tatsuya Kimura, IEEE Journal of Quantum Electronics,
15 Vol. QE-18, No. 4, pp. 488-495, 1982

Compared to spectral hole burning, measuring directly the eye-opening or bit-error rate detection, the advantages of using degree of polarization as a
20 feedback signal for adaptive polarization mode dispersion compensation are:

1. independent of bit rate
2. applicable to any modulation format without requiring modifications
- 25 3. insensitive to chromatic dispersion, such that degree

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

5

of polarization provides a good measure of signal distortion due to only polarization mode dispersion

Depicted in Fig. 2 are as a function of instantaneous differential group delay the degree of polarization and Q-penalty of a transmitted signal, non-return to zero (NRZ) format modulated with a bit rate of 48Gbit/s. The Q-penalty is defined here as:

$$Q\text{-penalty} = 20 \cdot \log \frac{\text{Eye - opening of received signal}}{\text{Back - to - back eye - opening}}$$

10

(1)

For reference, also shown in Fig. 2 is the power of the 24GHz (half the bit rate) spectral component as a function of instantaneous differential group delay. The spectral component at half the bit rate has been proved to show the strongest dependence on instantaneous differential group.

Contrary to the degree of polarization which shows only one maximum if the instantaneous differential group delay vanishes, the 24GHz spectral component shows a periodic behaviour. Therefore, in cases where the instantaneous differential group delay is expected to exceed on bit duration, at least one more spectral component, namely the 12GHz (quarter of the bit rate)

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

6

must be additionally tested to avoid an ambiguity.

The details of degree of polarization and the power of spectral components at 24GHz (half the bit rate), 12GHz (quarter of the bit rate) and 6GHz (eighth the bit rate) are depicted in Fig. 3 for small values of the instantaneous differential group delay.

Of critical importance in the application of degree of polarization as a feedback signal in an adaptive polarization mode dispersion compensator, is the accuracy (particularly the variance of the measured degree of polarization with the input state of polarization) with which the degree of polarization can be measured.

As can be seen from Fig. 2, if for example a Q-penalty of 0.5dB must not be exceeded, the dynamic range of the degree of polarization is $\pm 5\%$. The uncertainty, with which the degree of polarization is measured, must therefore not exceed 5%. An adaptive control algorithm of a polarization mode dispersion compensator needs to sample the degree of polarization in the environment of the optimum point in order to track the randomly varying differential group delay and principal states of polarization. Because of the required sampling by slightly mismatching the optical elements with respect to the polarization mode dispersion conditions in the

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

7

optical fiber, the required accuracy with which the degree of polarization can be measured is much more stringent.

A common approach for realizing the required accuracy is to mechanically align the optical components of a polarimeter in a distortion analyzer with high accuracy to predefined angles. However, this is a very tedious and therefore cost intensive way of construction.

10 Disclosure of Invention

It is an object of the present invention to provide a polarization mode dispersion compensator based on degree of polarization, which does not require a tedious and cost intensive way of construction.

15 The polarization mode dispersion compensator according to the present invention comprises an optical unit, a distortion analyzer and a controller. The optical unit receives an input optical signal and outputs an output optical signal. The distortion analyzer includes
20 a polarimeter, analyzes the output optical signal and produces a feedback signal, which represents degree of polarization of the output optical signal, by using a polarization property of the polarimeter. The polarization property is determined through calibration
25 using intensity signals output from the polarimeter.

The controller produces a control signal to adjust the optical unit, based on the feedback signal.

The optical unit corresponds to adaptive optics and includes one or more optical elements. the controller
5 corresponds to control logic which controls the optical unit using the degree of polarization as a feedback signal. The polarization property of the polarimeter is determined in advance to match the actual polarimeter through calibration. The distortion analyzer analyzes
10 the output optical signal from the optical unit, produces the feedback signal by using the obtained polarization property and outputs it to the controller. Because the polarization property is measured after the polarimeter is completely assembled, the requirements on mechanical
15 alignment accuracy are drastically relaxed. Tedious, highly-accurate mechanical alignment is no longer necessary, which can lead to a drastic cost reduction.

Brief Description of Drawings

20 Fig. 1 shows a configuration of a conventional polarization mode dispersion compensator.

Fig. 2 shows degree of polarization, Q-penalty and a spectral component as a function of instantaneous differential group delay.

25 Fig. 3 shows detail of degree of polarization,

Q-penalty and a spectral component as a function of instantaneous differential group delay.

Fig. 4 shows a configuration of a distortion analyzer.

5 Fig. 5 shows a model of a division of amplitude type polarimeter.

Fig. 6 shows representation of polarization properties of a division of amplitude type polarimeter in a Poincaré sphere.

10 Fig. 7 shows parameters of the elliptical retarders.

Fig. 8 shows a setup for calibration of a division of amplitude type polarimeter.

15 Fig. 9 shows a parametric plot of two intensity signals.

Fig. 10 shows a scaled parametric plot of two intensity signals.

Fig. 11 shows a location of the first equivalent analyzer polarization on a Poincaré sphere.

20 Fig. 12 shows a circle indicating possible locations of the second equivalent analyzer polarization on a Poincaré sphere.

Fig. 13 shows a cross point of circles indicating a possible location of the third equivalent analyzer polarization on a Poincaré sphere.
25

Fig. 14 shows an orthogonal type configuration of a division of amplitude type polarimeter.

Fig. 15 shows equivalent analyzer polarizations of an orthogonal type configuration on a Poincaré sphere.

5 Fig. 16 shows dependence of DOP accuracy on noise and angular uncertainty for an orthogonal type configuration.

Fig. 17 shows a variant configuration of an orthogonal type polarimeter.

10 Fig. 18 shows a tetragonal type configuration of a division of amplitude type polarimeter.

Fig. 19 shows equivalent analyzer polarizations of a tetragonal type configuration on a Poincaré sphere.

15 Fig. 20 shows dependence of DOP accuracy on noise and angular uncertainty for a tetragonal type configuration.

Fig. 21 shows a variant configuration of a tetragonal type polarimeter.

20 Fig. 22 shows a diamond type configuration of a division of amplitude type polarimeter.

Fig. 23 shows equivalent analyzer polarizations of a diamond type configuration on a Poincaré sphere.

Fig. 24 shows dependence of DOP accuracy on noise and angular uncertainty for a diamond type configuration.

25 Fig. 25 shows a variant configuration of a diamond

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

11

type polarimeter.

Fig. 26 shows another variant configuration of a diamond type polarimeter.

Fig. 27 shows a variant configuration of a division
5 of amplitude type polarimeter for autonomous calibration.

Fig. 28 shows another variant configuration of a division of amplitude type polarimeter for autonomous calibration.

10 Fig. 29 shows a polarization mode dispersion compensator using degree of polarization and a state of polarization as feedback signals.

Fig. 30 shows a polarization mode dispersion compensator using degree of polarization and/or a state
15 of polarization and a bit-error rate as feedback signals.

Best Mode for Carrying Out the Invention

Hereinafter, preferred embodiments according to the present invention will be described in detail by
20 referring to the drawings.

As a physical property of light, the degree of polarization is used for providing a feedback signal to adjust adaptive optics of a polarization mode dispersion compensator.

25 To measure the degree of polarization, an incident

beam of light is split into four or more beams, each of which passes through individually arranged retardation and polarizing optics. This type of polarization measurement system can be called a division of amplitude type polarimeter. From the intensities of those beams, the state of polarization and the degree of polarization can be calculated if, and only if, the polarization properties of the paths each beam travels are known. The accuracy with which the state of polarization and degree of polarization can be measured by such an instrument, depends strongly on the accuracy with which the polarization properties of each path, particularly e.g. polarizer angle, retardance of a path, etc. are known. In the following, an advantageous solution for measuring the polarization properties with high accuracy of each of the split beams is described.

Fig. 4 shows an example of the configuration of a distortion analyzer which measures the degree of polarization and/or the state of polarization. The polarimeter 21 splits a light beam into several beams and outputs intensity signals of those beams. The intensity signals are amplified by the amplifier 22 and converted into digital signals by the analog-to-digital (A/D) converter 23. The central processing unit (CPU) 24 calculates the degree of polarization and/or the state

of polarization using the values of the digital signals and outputs the obtained result as a feedback signal.

In the following, various methods will be described to applying degree of polarization as a feedback signal to adaptive polarization mode dispersion compensators. The described methods include advantageous construction of polarimeters with respect to degree of polarization measurement accuracy. To relax the stringent requirements on how exact optical components are aligned, or their orientation is at least known, calibration methods will be described including adapted variations of polarimeter constructions.

As mentioned above, a division of amplitude type polarimeter refers to a polarimeter in which an incoming light beam is split into several beams. Each beam is then individually guided through optical components like polarizer (analyzer) and retarder. From the measured intensities, the state of polarization can be calculated.

A division of amplitude type polarimeter can be modeled as depicted in Fig. 5. An incoming light beam \vec{S} is split into four beams (more than four beams possible, four beams selected for description for clarity reasons) by beam splitter 31. Each of the split beams propagates through a combination of retarder 32 and polarizer 33 and their respective intensities I_0 , I_1 , I_2 and I_3 , are

detected by photodiodes 34. The retarder/polarizer combination represents an elliptical polarizer, characterized by an azimuth θ , an ellipticity ϵ and an extinction ratio ER. The extinction ratio is the relation
 5 between the minimum, τ_{\min} , and maximum, τ_{\max} , transmitted intensity for all possible input states of polarization. The polarization properties each beam experiences while propagating from the input through the beam splitter 31 until it reaches the polarizer 33, are incorporated
 10 in this model by the respective retarder/polarizer combination.

The relation between the detected intensities I_0 , I_1 , I_2 and I_3 , and the polarization of light at the input of the beam splitter 31 (Stokes vector \vec{S}) can be given
 15 as:

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = Z \cdot \vec{S}, \quad (2)$$

$$Z = \begin{pmatrix} \tau_{e0} & \tau_{e0} \cos 2\theta_0 \cos 2\epsilon_0 & \tau_{e0} \sin 2\theta_0 \cos 2\epsilon_0 & \tau_{e0} \sin 2\epsilon_0 \\ \tau_{e1} & \tau_{e1} \cos 2\theta_1 \cos 2\epsilon_1 & \tau_{e1} \sin 2\theta_1 \cos 2\epsilon_1 & \tau_{e1} \sin 2\epsilon_1 \\ \tau_{e2} & \tau_{e2} \cos 2\theta_2 \cos 2\epsilon_2 & \tau_{e2} \sin 2\theta_2 \cos 2\epsilon_2 & \tau_{e2} \sin 2\epsilon_2 \\ \tau_{e3} & \tau_{e3} \cos 2\theta_3 \cos 2\epsilon_3 & \tau_{e3} \sin 2\theta_3 \cos 2\epsilon_3 & \tau_{e3} \sin 2\epsilon_3 \end{pmatrix}.$$

20 The angles θ_0 , θ_1 , θ_2 , θ_3 , and ϵ_0 , ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 describe

the elliptical retarder properties of each retarder/polarizer combination. The coefficients τ_{00} , τ_{01} , τ_{02} and τ_{03} , and τ_{10} , τ_{11} , τ_{12} and τ_{13} are related to the minimum, τ_{\min} , and maximum, τ_{\max} , transmitted intensity (transmission coefficient) for all possible input states of polarization by:

$$\tau_a = (\tau_{\max} + \tau_{\min})/2, \quad (3)$$

$$\tau_d = (\tau_{\max} - \tau_{\min})/2. \quad (4)$$

10

Each row of the instrument matrix Z can be thought of in the same way as a Stokes vector, describing a state of polarization with azimuth θ and ellipticity ϵ . Consequently, the retarder/polarizer combination each beam passes, can be represented by a point on the Poincaré sphere as depicted in Fig. 6. The representation in the Poincaré sphere of the polarization properties each beam experiences, can be called equivalent analyzer polarization.

20

The depicted example of equivalent analyzer polarizations A0, A1, A2 and A3 shows the situation for a division of amplitude type polarimeter, whereas the parameters of the elliptical retarders (equivalent analyzers) are as shown in Fig. 7.

25

In the case the equivalent analyzer polarizations

and respective extinction ratios are known, the division of amplitude polarimeter is fully characterized with respect to its polarization properties. The instrument matrix Z can be calculated and the Stokes vector \vec{S} at the input of the polarimeter can be calculated from the detected intensities I_0 , I_1 , I_2 and I_3 at the photodiodes 34.

A conventional procedure is to first select values for the equivalent analyzer polarizations and then assembling the optical components such that their mechanical alignment match the preselected instrument matrix. Depending on required accuracy, the alignment must be very precise. This leads to a tedious and cost intensive assembling.

A different approach, outlined in the following, provides a procedure to measure the equivalent analyzer polarizations and respective extinction ratios with high accuracy. The optical components can therefore be assembled with relaxed requirements on alignment precision. This leads to an improved performance while at the same time providing a way of cost reduction for assembling.

Fig. 8 shows a setup for autonomous calibration of a division of amplitude type polarimeter. The calibration procedure starts by measuring an assemble

of intensity vectors I_0 , I_1 , I_2 , and I_3 for different states of input polarization. The different states of input polarization are provided by narrow-bandwidth laser 41 launching fully polarized light (DOP = 100%) into polarization converter 42 with negligible or at least very low variation of its insertion loss.

The free-running or by means of external signals controlled polarization converter 42 launches states of polarization into the, to be calibrated, division of amplitude polarimeter 43 such that the Poincaré sphere is fully covered.

In the case the input polarization is modulated in this way, a parametric plot of any two out of the four intensity signals leads always to points in a plane surrounded by an ellipse as depicted in Fig. 9. The left, right, lower and upper bounds of the ellipse equal the minimum, t_{\min} , and maximum, t_{\max} , transmission coefficients of the respective analyzers.

After scaling the intensity signals such that the ellipse fits into a square with length of the sides of 1 (multiplication of the intensity signals with factors a and b) as depicted in Fig. 10, the ellipticity equals, in Poincaré sphere representation, half of the angular spacing ϵ_{01} between the two equivalent analyzer polarizations for which the parametric plot was drawn.

In the following reference, construction of an all-fiber optical in-line and off-line polarization analyzer is shown and application of a setup in which a device under test is placed between in-line and off-line polarimeter to characterize its polarization transfer function is described. Measurable parameters are polarization dependent loss, retardation, differential group delay and depolarization. Further included applications are fiber-optical polarimetric sensors, particularly temperature sensors. Especially, mathematics related to properties of intensity vectors of a division of amplitude type polarimeter is described on pages 46 through 51.

15 "Selbstkalibrierender faseroptischer Polarisationsanalysator", Jens C. Rasmussen, Ph.D thesis, RWTH Aachen (Germany), Shaker Verlag, ISBN 3-8265-4450-1, 1998

20 After the relative angular distances ϵ_{01} , ϵ_{02} , ϵ_{03} , ϵ_{12} and ϵ_{13} between the equivalent analyzer polarizations are known, the absolute positions are derived as follows.

The measurement of the degree of polarization is invariant to a rotation of the reference frame (rotation of the Poincaré sphere in both possible directions) for

25

which the state of polarization is measured. Even for the measurement of the state of polarization itself, a rotation of the reference frame always happens during light propagates through an optical fiber due to internal and externally introduced birefringence. The absolute orientation of the reference frame (angular orientation of the Poincaré sphere) is therefore not important in cases, like here, polarization of light is measured, which has passed through an optical fiber.

10 The first equivalent analyzer polarization A0 can therefore be located at an arbitrary position on the Poincaré sphere as depicted in Fig. 11. It is fixed here to (azimut, ellipticity) = (0, 0).

The second equivalent analyzer polarization A1 is located with an angular distance ϵ_0 from the first equivalent analyzer polarization A0 on the Poincaré sphere. Possible locations describe therefore a circle around the first equivalent analyzer polarization A0. Due to the previously described rotational invariance, the cross point of the circle of possible locations and the equator of the Poincaré sphere is selected as depicted in Fig. 12.

The third equivalent analyzer polarization A2 is located with an angular distance ϵ_{22} from the first equivalent analyzer polarization A0, and with an angular

25

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

20

distance ϵ_{12} from the second equivalent analyzer polarization A1, on the Poincaré sphere. Possible locations are therefore the two cross points of the circles around the first and second equivalent analyzer polarizations A0 and A1. From those two possible locations of the third equivalent analyzer polarization A2 one can be selected as depicted in Fig. 13.

The fourth equivalent analyzer polarization A3 is located with an angular distance ϵ_{03} from the first equivalent analyzer polarization A0, with an angular distance ϵ_{13} from the second equivalent analyzer polarization A1, and with an angular distance ϵ_{23} from the third equivalent analyzer polarization A2 on the Poincaré sphere. Possible locations are therefore the two cross points of the circles around the first, second and third equivalent analyzer polarizations A0, A1 and A2. From those possible locations of the fourth equivalent analyzer polarization A3 one can be selected.

In the following, the mathematics used to derive the calibration procedure is shown. Each analyzer of a division of amplitude type polarimeter can be described with respect to a common, arbitrary reference plane by an elliptical polarizer. The intensity I_n ($n=0,1,2,3$) which can be detected by the n-th analyzer is:

25

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

21

$$I_n = \tau_{an} + \tau_{dn} (\cos 2\theta_n \cos 2\epsilon_n S_1 + \sin 2\theta_n \cos 2\epsilon_n S_2 + \sin 2\epsilon_n S_3). \quad (5)$$

The polarization in the reference plane is described by the Stokes parameters S_0 , S_1 , S_2 and S_3 . The equivalent analyzer polarization of the n -th analyzer is characterized by an azimuth θ_n and an ellipticity ϵ_n . The factors τ_{an} and τ_{dn} can be calculated from the transmission coefficients $\tau_{\max n} = I_{\max n}$ and $\tau_{\min n} = I_{\min n}$:

$$\tau_{an} = (\tau_{\max n} + \tau_{\min n}) / 2 \quad (6)$$

$$\tau_{dn} = (\tau_{\max n} - \tau_{\min n}) / 2 \quad (7)$$

Looking at three analyzers which detect the intensities I_0 , I_1 and I_2 , leads to the following equation:

$$\vec{I} = \vec{Z}' \cdot \vec{S}', \quad (8)$$

$$\vec{I} = \begin{pmatrix} I_0 - \tau_{d0} \\ I_1 - \tau_{d1} \\ I_2 - \tau_{d2} \end{pmatrix}, \quad \vec{S}' = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix},$$

$$\vec{Z}' = \begin{pmatrix} \tau_{d0} \cos 2\theta_0 \cos 2\epsilon_0 & \tau_{d0} \sin 2\theta_0 \cos 2\epsilon_0 & \tau_{d0} \sin 2\epsilon_0 \\ \tau_{d1} \cos 2\theta_1 \cos 2\epsilon_1 & \tau_{d1} \sin 2\theta_1 \cos 2\epsilon_1 & \tau_{d1} \sin 2\epsilon_1 \\ \tau_{d2} \cos 2\theta_2 \cos 2\epsilon_2 & \tau_{d2} \sin 2\theta_2 \cos 2\epsilon_2 & \tau_{d2} \sin 2\epsilon_2 \end{pmatrix}.$$

WO 03/021822

PCT/JPO1/07568

22

Assuming a constant degree of polarization $p = (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{1/2}$, each state of polarization described by the vector $\vec{S} = (S_1, S_2, S_3)^T$ satisfies:

$$\begin{aligned} \vec{S}^T \cdot \mathbf{E} \cdot \vec{S} &= p^2, \\ \mathbf{E}: \text{unit matrix.} \end{aligned} \quad (9)$$

This equation describes a sphere in the variables of the vector components of \vec{S} with a radius p . Combining equations (8) and (9) leads to:

$$p^2 = \vec{S}^T \cdot \mathbf{E} \cdot \vec{S} \quad (10)$$

$$= (\mathbf{Z}^{-1} \cdot \vec{I})^T \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{Z}^{-1} \cdot \vec{I} \quad (11)$$

$$= \frac{1}{\det(\mathbf{Z})} (\mathbf{Z}^T \cdot \vec{I})^T \cdot \mathbf{E} \cdot \frac{1}{\det(\mathbf{Z})} \mathbf{Z}^T \cdot \vec{I} \quad (12)$$

$$\Rightarrow \vec{I}^T \cdot \mathbf{Z}^T \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{Z} \cdot \vec{I} = p^2 (\det(\mathbf{Z}))^2. \quad (13)$$

The resultant equation describes a second order plane in the variables of the components of the vector in three dimensions. A further classification is possible. All eigenvalues of the symmetric matrix $\mathbf{Z}^T \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{Z}$ are real and positive. The term $p^2 (\det(\mathbf{Z}))^2$ is also always positive. The equation (13) describes therefore an ellipsoid, under the assumption of regularity of the matrix \mathbf{Z} and all its column vectors are linear

independent. The physical meaning is, that all analyzers are polarizer ($\tau_{0n} > 0$) and the equivalent analyzer polarization are not pairwise identical.

Normalizing the components of the intensity vector

5 \vec{I} , the vectors

$$\vec{I}' = \begin{pmatrix} 1/(\tau_{\max 0} - \tau_{\min 0}) & 0 & 0 \\ 0 & 1/(\tau_{\max 1} - \tau_{\min 1}) & 0 \\ 0 & 0 & 1/(\tau_{\max 2} - \tau_{\min 2}) \end{pmatrix} \cdot \vec{I} \quad (14)$$

10 describe an ellipsoid, which is inscribed into a cube with the length of all sides equal to one. The possible values for each component of the intensity vector \vec{I}' is now limited to $-0.5 < I_n'' < 0.5$. The first analyzer detects a maximum intensity $I_0'' = 0.5$ if the polarization in the
 15 reference plane equals the equivalent analyzer polarization. For the first analyzer, the detected intensity I_0'' :

$$I_0'' = 0.5 \text{ therefore maximum for } \begin{cases} S_1 = \cos 2\theta_1 \cos 2\epsilon_1 \\ S_2 = \cos 2\theta_1 \cos 2\epsilon_1 \\ S_3 = \sin 2\epsilon_1 \end{cases}$$

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

24

The second analyzer detects at the same polarization at which the first analyzer detect the maximum intensity, an intensity I_1'' with:

$$\begin{aligned}
 2I_1''(I_0'' = 0.5) = & \cos 2\theta_0 \cos 2\epsilon_0 \cos 2\theta_1 \cos 2\epsilon_1 \\
 & + \sin 2\theta_0 \cos 2\epsilon_0 \sin 2\theta_1 \cos 2\epsilon_1 \\
 & + \sin 2\epsilon_0 \sin 2\epsilon_1.
 \end{aligned} \quad (16)$$

The right side of equation (16) is equal to the cosine of the angle $\angle \vec{P}_{A00} \vec{P}_{A01}$ between the equivalent analyzer polarizations of the first \vec{P}_{A00} and second \vec{P}_{A01} analyzer, because

$$\cos(\angle \vec{P}_{A00} \vec{P}_{A01}) = \frac{|\vec{P}_{A00} \cdot \vec{P}_{A01}|}{|\vec{P}_{A00}| \cdot |\vec{P}_{A01}|}. \quad (17)$$

15

The orthogonal projection of the ellipsoid composed of the vectors \vec{I}'' on the coordinate plane I_0'' , I_1'' leads to a plane with an elliptical shape. For the length of the main axis a and b and the ellipticity e of the elliptically shaped plane and for the value $I_1''(I_0''_{\max})$, the following relations apply:

$$\tan e = \frac{b}{a}, \quad (18)$$

$$\cos \delta = 2 I_1''(I_0''_{\max}), \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} a^2 + b^2 &= \frac{1}{2} \\ \pm ab &= \frac{1}{4} \sin \delta \end{aligned} \right\} \text{Lemma of Apollonius.} \quad (20)$$

From this, the relation of the angle between the
 5 equivalent analyzer polarizations \vec{E}_{Ave} , \vec{E}_{Ave} and the
 ellipticity ϵ can be derived. From equations (18)-(20):

$$\begin{aligned} \frac{2ab}{a^2 + b^2} &= \pm \sin \delta \\ &= \frac{2 \tan \epsilon}{1 + \tan^2 \epsilon} \\ &= \sin 2\epsilon \\ 10 \quad \Rightarrow \quad \delta &= \pm 2\epsilon. \end{aligned} \quad (21)$$

With equations (16), (17) and (19) the relation
 of the angle $\angle \vec{E}_{\text{Ave}}, \vec{E}_{\text{Ave}}$ between two equivalent analyzer
 15 polarizations \vec{E}_{Ave} , \vec{E}_{Ave} and the ellipticity ϵ_{nm}
 calculates to:

$$\cos(\angle \vec{E}_{\text{Ave}}, \vec{E}_{\text{Ave}}) = 2I_1''(I_0''_{\max}) = \cos \delta_{\text{nm}} = \cos 2\epsilon_{\text{nm}} \quad (22)$$

$$\Rightarrow \angle \vec{E}_{\text{Ave}}, \vec{E}_{\text{Ave}} = 2\epsilon_{\text{nm}}. \quad (23)$$

20

This applies to each possible pair of analyzers.

Next, with respect to the principle measurement accuracy of the degree of polarization, three configurations and possible variations of a division of amplitude type polarimeter are discussed. Those configurations are named "Orthogonal", "Tetragonal" and "Diamond". They differ in the number and arrangement of utilized optical components. The "Orthogonal" scheme is used in the following reference.

- 10 "A study for wavelength dependency of Polarization Analysis Module", T. Miyakoshi, S. Shikii, Y. Hotta, S. Boku, Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, sougou taikai 8-10-95, p.528, 2001

15

In this reference, a division of amplitude type polarimeter, composed of three beam-splitters, four polarizers, one quarter-wave retarder, four photodiodes and data acquisition electronics are described.

- 20 "Tetragonal" is a compromise between complexity and realizable accuracy. "Diamond" is with respect to DOP accuracy and sensitivity to noise an ideal configuration but requires the most complex arrangement.

To compare the principal performance of a specific arrangement, the condition number of the 4x4 instrument

25

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

27

matrix, describing the relation between measured optical intensities and the Stokes vector, can be used. The condition numbers (calculated according to Hadamard) of the schemes "Orthogonal", "Tetragonal" and "Diamond" are 2.0, 1.5 and 1.3, respectively.

In order to numerically investigate the dependence of the principal DOP accuracy on angular misalignment of optical components, the difference between real and supposed polarizer angles has been varied through the values 0°, 0.1°, 0.5°, 1° up to 2°. Those values were alternatively added to and subtracted from the four polarizer angles, which can be supposed to be approximately the worst case.

To take further into account noise, the quantification noise due to A/D conversion of the photodiode currents is supposed to be the main source. The resolution of A/D conversion has been varied through the values 8, 10, 12, 14 up to 16bit.

The offsets due to photodiode dark currents and amplifiers are supposed to be zero. Signals are supposed to fully cover the dynamic range of the A/D conversion. Extinction ratios of the polarizers are supposed to be arbitrary high. Incorporated retardations are supposed to be fixed.

An "Orthogonal" type configuration of a division

of amplitude type polarimeter is depicted in Fig. 14. A basic configuration of this polarimeter includes three beam splitters 51, 52 and 53, four polarizers 54, 55, 56 and 57, and one retarder 58 with retardation of a quarter of a wavelength. Angles of the polarizers 54 and 57 are 0° and angles of the polarizers 55 and 56 are 45° and -45° , respectively. As shown in Fig. 15, the components are arranged such that the equivalent analyzer polarizations (A0, A1, A2, A3) are mutually orthogonal on a Poincaré sphere. The dependence of the principal DOP accuracy [%] on noise (A/D resolution [bit]) and angular uncertainty [$^\circ$] is shown for exemplified values in Fig. 16.

A variant configuration of the "Orthogonal" type polarimeter is depicted in Fig. 17. This polarimeter includes three beam splitters 61, 62 and 63, four polarizers 64, 65, 66 and 67, and one retarder 68 with retardation of a quarter of a wavelength. Angles of the polarizers 64 and 65 are 0° and angles of the polarizers 66 and 67 are 45° and -45° , respectively.

A "Tetragonal" type configuration of a division of amplitude type polarimeter is depicted in Fig. 18. A basic configuration of this polarimeter includes three beam splitters 71, 72 and 73, four polarizers 74, 75, 76 and 77, and one retarder 78 with retardation of a

quarter of a wavelength. Angles of the polarizers 74 and 77 are 0° and angles of the polarizers 75 and 76 are 60° and -60° , respectively. As shown in Fig. 19, the components are arranged such that the equivalent analyzer polarizations (A0, A1, A2, A3) are angular spaced by 120° on a Poincaré sphere. A3 is orthogonal to all other equivalent analyzer polarizations. The dependence of the principal DOP accuracy on noise and angular uncertainty is shown for exemplified values in Fig. 20.

10 A variant configuration of the "Tetragonal" type polarimeter is depicted in Fig. 21. This polarimeter includes three beam splitters 81, 82 and 83, four polarizers 84, 85, 86 and 87, and one retarder 88 with retardation of a quarter of a wavelength. Angles of the
15 polarizers 84 and 85 are 0° and angles of the polarizers 86 and 87 are 60° and -60° , respectively.

A "Diamond" type configuration of a division of amplitude type polarimeter is depicted in Fig. 22. A basic configuration of this polarimeter includes three
20 beam splitters 91, 92 and 93, four polarizers 94, 95, 96 and 97, and four retarders 98, 99, 100 and 101. Angles of the polarizers 94 and 97 are 0° and angles of the polarizers 95 and 96 are 60° and -60° , respectively. Retardation of the retarders 98, 99 and 100 is $1/18.48$
25 of a wavelength and that of the retarder 101 is a quarter

of a wavelength. As shown in Fig. 23, the components are arranged such that the equivalent analyzer polarizations (A0, A1, A2, A3) form a structure like atoms in a diamond on a Poincaré sphere. The dependence
5 of the principal DOP accuracy on noise and angular uncertainty is shown for exemplified values in Fig. 24.

A variant configuration of the "Diamond" type polarimeter is depicted in Fig. 25. This polarimeter includes three beam splitters 111, 112 and 113, four
10 polarizers 114, 115, 116 and 117, and four retarders 118, 119, 120 and 121. Angles of the polarizers 114 and 115 are 0° and angles of the polarizers 116 and 117 are 60° and -60°, respectively. Retardation of the retarder 118 is a quarter of a wavelength and that of the retarders
15 119, 120 and 121 is 1/18.48 of a wavelength.

Fig. 26 shows another variant configuration of the "Diamond" type polarimeter. This polarimeter includes three beam splitters 131, 132 and 133, four polarizers 134, 135, 136 and 137, and two retarders 138 and 139.
20 Angles of the polarizers 134 and 135 are 0° and angles of the polarizers 136 and 137 are 60° and -60°, respectively. Retardation of the retarder 138 is 1/18.48 subtracted from a quarter of a wavelength and that of the retarder 139 is 1/18.48 of a wavelength.

25 In the above described configurations, the angles

of the polarizers and the retardation of the retarders are not limited to the respective theoretical values themselves but can be within a given tolerance range ($\pm 5\%$ for example) of the values.

5 The autonomous calibration procedure requires besides a constant degree of polarization of the light source, which is easy to realize, a constant input power. This can be realized by either using polarization converters for polarization modulation with low
10 dependence of the insertion loss on polarization like crystal based or fiber based devices. In the case a polarization converter with intolerable high dependence of insertion loss on polarization is used, like multi stages of variable birefringent plates or integrated
15 optical realizations, the power of the light wave must be measured simultaneous with the intensities of the polarimeter to be calibrated.

Simultaneous power measurement can be either realized by a 1x2 coupler, whereas one arm is used for
20 power monitoring and the other for the polarimeter to be calibrated.

An alternative is to realize a division of amplitude type polarimeter where only three polarizers are used and one of the four light beams is used for the power
25 monitoring as depicted in Fig. 27. The configuration

shown in Fig. 27 is obtained by removing the polarizer 67 from the configuration shown in Fig. 17.

Another realization possibility is depicted in Fig. 28, in which the light beam is split into five beams. The configuration shown in Fig. 28 is obtained by inserting an additional beam splitter 140 into the configuration shown in Fig. 26. While four of the beams are transmitted through optics as described above, the fifth beam from the beam splitter 140 is used for power monitoring.

In the application of a division of amplitude type polarimeter for an adaptive polarization mode dispersion compensator as a distortion monitor, one of the described variants can be used, whereas the required accuracy for the degree of polarization measurement is provided after the described calibration procedure (measurement of the instrument matrix Z) has been applied. The basic algorithm for adjusting the adaptive optics of a polarization mode dispersion compensator, is provided by means of a gradient search algorithm assuring a maximum degree of polarization.

In order to improve the speed with which the adaptive optics of a polarization mode dispersion compensator can be controlled and/or to avoid ambiguities of the correlation between degree of polarization and

signal distortion due to polarization mode dispersion, in the following other variants are described.

While it is possible to adaptively control a polarization mode dispersion compensator by tracking the maximum degree of polarization, the principal
5 realizable tracking speed could be improved by including the measured state of polarization. In general, the measured state of polarization is very sensitive to variations of the polarization transfer function of an
10 optical fiber, while the degree of polarization shows only moderate sensitivity which can be covered by the limited measurement accuracy even if it is in the order of 1% or better.

Monitoring beside the degree of polarization also
15 the state of polarization as depicted in Fig. 29 leads to the possibility of a more sophisticated algorithm. The polarization mode dispersion compensator shown in Fig. 29 includes adaptive optics 141, distortion analyzer 142 and control logic 143. The distortion analyzer 142
20 provides beside the degree of polarization as a measure of signal distortion also the state of polarization to the control logic 143 as feedback signals. The control logic 143 receives the feedback signals and produces a control signal for the adaptive optics 141 based on
25 the received signals.

As long as the state of polarization shows only small variations, the polarization mode dispersion properties of the optical transmission system also only vary slightly and readjustment of the adaptive optics 141 is not required during this time. This idle time can be advantageously used to perform other operations like readjusting or rewinding components of a polarization converter to their main operating point.

In the case the state of polarization changes, the polarization mode dispersion properties of the optical transmission system have changed and readjustment of the adaptive optics 141 is necessary. The angular change and speed with which the state of polarization has changed, can be used as a measure of how strong the conditions of the adaptive optics 141 must be readjusted.

To avoid ambiguities, i.e. cases in which a maximum degree of polarization does not correspond to minimum signal distortion, a combination of degree of polarization as a fast feedback signal, and a bit-error rate as provided by e.g. forward-error-correcting electronics as an ultimate measure of signal distortion can be used as depicted in Fig. 30. The polarization mode dispersion compensator shown in Fig. 30 has a similar configuration to that shown in Fig. 29. The distortion analyzer 142 provides the control logic 143 with only

the degree of polarization or the combination of the degree of polarization and the state of polarization. Receiver 144 includes forward-error-correcting electronics and outputs a bit-error rate as a feedback signal. The control logic 143 receives the feedback signals from the distortion analyzer 142 and the receiver 144 and produces a control signal for the adaptive optics 141 based on the received signals.

While fast changes of the polarization mode dispersion properties of an optical transmission system require a fast feedback signal as provided by the measurement of the degree of polarization, for fine tuning purposes the bit-error rate as provided by the forward-error-correcting electronics at the receiver 144 is used.

As described in detail above, according to the present invention, the requirements on mechanical alignment accuracy for a polarimeter are drastically relaxed since the polarization properties are measured after the polarimeter is assembled. Therefore, tedious and cost intensive mechanical alignment is not required.

CLAIMS

1. A polarization mode dispersion compensator comprising:
- 5 an optical unit receiving an input optical signal and outputting an output optical signal;
- a distortion analyzer which includes a polarimeter, analyzing the output optical signal and producing a feedback signal, which represents degree of polarization
- 10 of the output optical signal, by using a polarization property of the polarimeter, the polarization property determined through calibration using a plurality of intensity signals output from the polarimeter; and
- a controller producing a control signal to adjust
- 15 said optical unit, based on the feedback signal.
2. A polarization mode dispersion compensator according to claim 1, wherein:
- said polarimeter includes a plurality of optical
- 20 components to produce the intensity signals;
- said distortion analyzer produces the feedback signal by using information of an instrument matrix of the polarimeter as the polarization property; and
- the information of the instrument matrix is
- 25 obtained by inputting light with different states of

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

37

polarization into the polarimeter such that a Poincaré sphere is fully covered and measuring the intensity signals output from the polarimeter.

5 3. A polarization mode dispersion compensator according to claim 2, wherein

the information of the instrument matrix is obtained by plotting two of the intensity signals on a plane for the different states of polarization and
10 determining an azimuth and an ellipticity of an ellipse which surrounds plotted points.

4. A polarization mode dispersion compensator according to claim 3, wherein

15 maximum and minimum intensity of the plotted points are further determined for each of the two of the intensity signals and used, together with the azimuth and ellipticity, as the information of the instrument matrix.

20 5. A polarization mode dispersion compensator according to claim 1, wherein:

said polarimeter includes a plurality of optical components forming four analyzers to produce four intensity signals; and

25 the optical components are arranged such that

equivalent analyzer polarizations of three of the four
analyzers are angular spaced by 120 degrees on a Poincaré
sphere and an equivalent analyzer polarization of another
of the four analyzers is orthogonal to the equivalent
5 analyzer polarizations of the three analyzers on the
Poincaré sphere.

6. A polarization mode dispersion compensator
according to claim 1, wherein:
10 said polarimeter includes a plurality of optical
components forming four analyzers to produce four
intensity signals; and
the optical components are arranged such that
equivalent analyzer polarizations of the four analyzers
15 form a structure like atoms in a diamond on a Poincaré
sphere.

7. A polarization mode dispersion compensator
according to claim 1, wherein:
20 said distortion analyzer produces a feedback
signal which represents a state of polarization of the
output optical signal; and
said controller produces the control signal based
on both the feedback signal representing the degree of
25 polarization and the feedback signal representing the

state of polarization.

8. A polarization mode dispersion compensator according to claim 1, wherein

5 said controller receives a feedback signal which represents a bit-error rate of the output optical signal and produces the control signal based on both the feedback signal representing the degree of polarization and the feedback signal representing the bit-error rate.

10

9. A polarization mode dispersion compensator according to claim 1, wherein:

said distortion analyzer produces a feedback signal which represents a state of polarization of the output optical signal; and

15

said controller receives a feedback signal which represents a bit-error rate of the output optical signal and produces the control signal based on the feedback signal representing the degree of polarization, the feedback signal representing the state of polarization and the feedback signal representing the bit-error rate.

20

10. A distortion analyzer comprising:

a polarimeter which includes a plurality of optical components to produce a plurality of intensity signals

25

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

40

from an input optical signal; and

a processor producing a feedback signal, which represents degree of polarization of the input optical signal, for polarization mode dispersion compensation from the intensity signals by using a polarization property of the polarimeter, the polarization property determined through calibration using intensity signals output from the polarimeter.

- 10 11. A polarimeter comprising:
three beam splitters;
two polarizers within a given tolerance range of
zero degrees;
a polarizer within a given tolerance range of 60
15 degrees;
a polarizer within a given tolerance range of -60
degrees; and
a retarder within a given tolerance range of a
quarter of a wavelength,
20 wherein the beam splitters, the polarizers and the
retarder form four analyzers to produce four intensity
signals, and are arranged such that equivalent analyzer
polarizations of three of the four analyzers are angular
spaced by 120 degrees on a Poincaré sphere and an
25 equivalent analyzer polarization of another of the four

analyzers is orthogonal to the equivalent analyzer polarizations of the three analyzers on the Poincaré sphere.

- 5 12. A polarimeter comprising:
three beam splitters;
two polarizers within a given tolerance range of
zero degrees;
a polarizer within a given tolerance range of 60
10 degrees;
a polarizer within a given tolerance range of -60
degrees;
a retarder within a given tolerance range of a
quarter of a wavelength; and
15 three retarders within a given tolerance range of
1/18.48 of a wavelength,
wherein the beam splitters, the polarizers and the
retarders form four analyzers to produce four intensity
signals, and are arranged such that equivalent analyzer
20 polarizations of the four analyzers form a structure
like atoms in a diamond on a Poincaré sphere.
13. A polarimeter comprising:
three beam splitters;
25 two polarizers within a given tolerance range of

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

42

zero degrees;
a polarizer within a given tolerance range of 60
degrees;
a polarizer within a given tolerance range of -60
5 degrees;
a retarder within a given tolerance range of $1/18.48$
subtracted from a quarter of a wavelength; and
a retarder within a given tolerance range of $1/18.48$
of a wavelength,
10 wherein the beam splitters, the polarizers and the
retarders form four analyzers to produce four intensity
signals, and are arranged such that equivalent analyzer
polarizations of the four analyzers form a structure
like atoms in a diamond on a Poincaré sphere.
15
14. A method of polarization mode dispersion
compensation, comprising:
determining a polarization property of a
polarimeter through calibration using a plurality of
20 intensity signals output from a polarimeter;
producing an output optical signal through an
optical unit from an input optical signal;
analyzing the output optical signal and producing
a feedback signal, which represents degree of
25 polarization of the output optical signal, by using the

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

43

polarization property of the polarimeter; and
adjusting said optical unit according to the
feedback signal.

WO 03/021822

PCT/JP91/07568

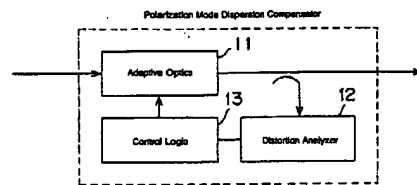
 $\frac{1}{30}$ 

FIG. 1

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

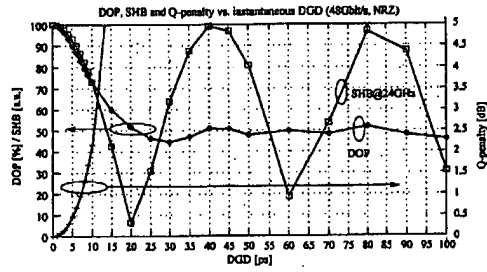
 $\frac{2}{30}$ 

FIG. 2

WO 03/021822

PCT/JPO1/07568

3 / 30

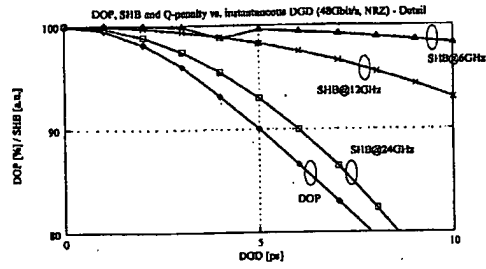


FIG. 3

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

4 / 30

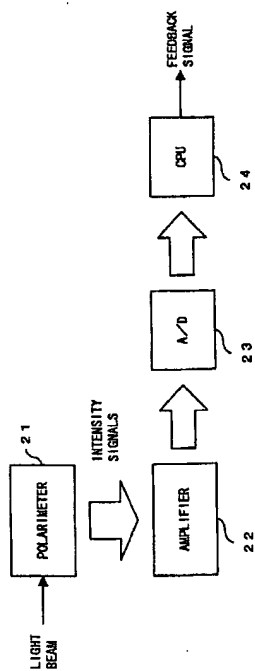


FIG. 4

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

5 / 30

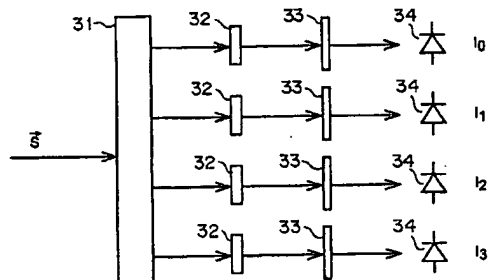


FIG. 5

WO 03/021822

PCT/JPO1/07568

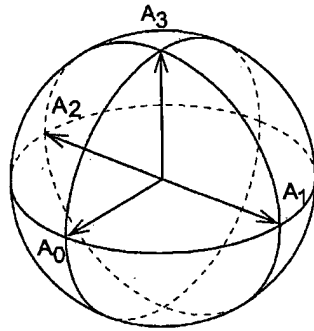
 $\frac{6}{30}$ 

FIG. 6

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

 $\frac{7}{30}$

| No. | θ | ε |
|-----|-------------|---------------|
| 0 | 0° | 0° |
| 1 | $+45^\circ$ | 0° |
| 2 | -45° | 0° |
| 3 | 0° | 45° |

FIG. 7

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

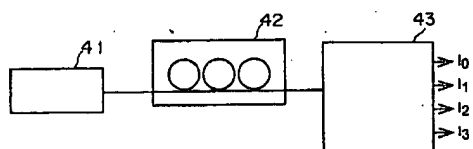
8/
30

FIG. 8

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

9/30

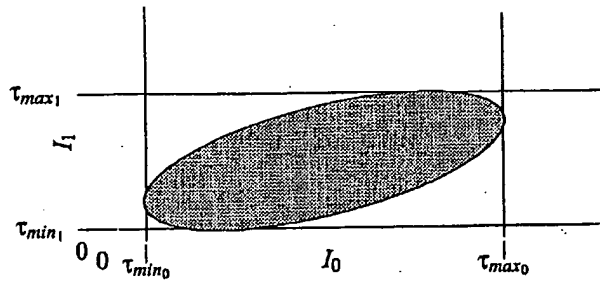


FIG. 9

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

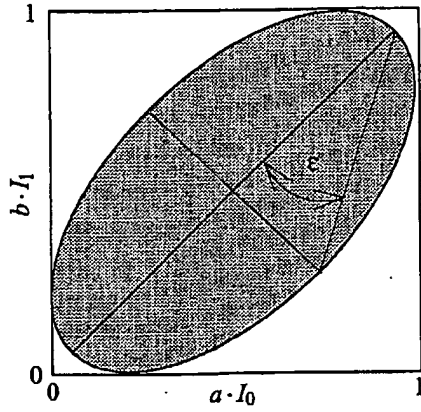
 $\frac{10}{30}$ 

FIG. 10

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

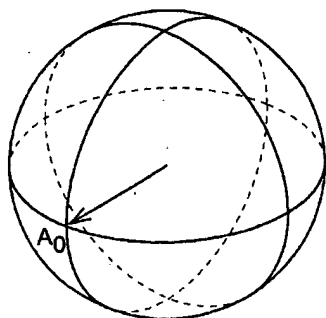
 $\frac{11}{30}$ 

FIG. 11

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

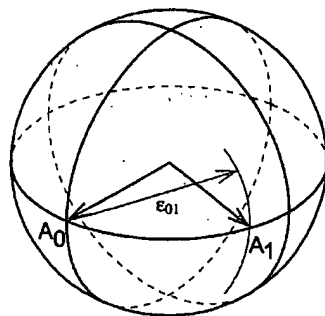
 $\frac{12}{30}$ 

FIG. 12

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

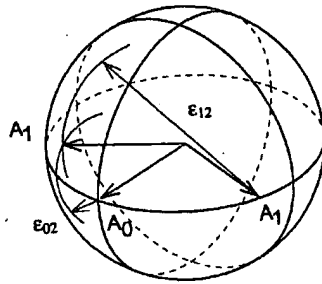
 $\frac{13}{30}$ 

FIG. 13

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

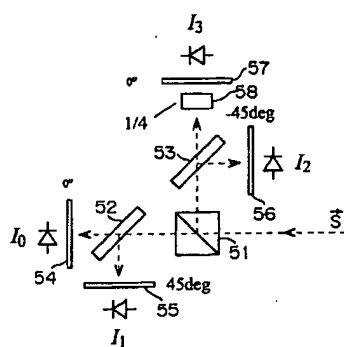
14/
30

FIG. 14

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

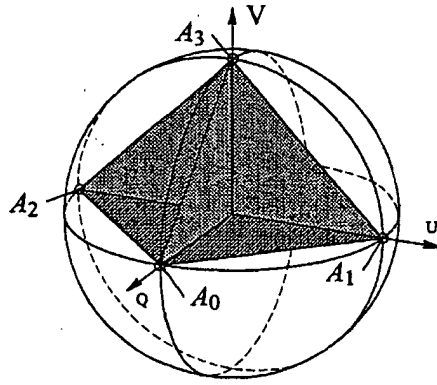
 $\frac{15}{30}$ 

FIG. 15

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

 $\frac{16}{30}$

| [bit] \ [°] | 2.0 | 1.0 | 0.5 | 0.1 | 0.0 |
|-------------|-------|-------|------|------|------|
| 8 | 21.88 | 12.09 | 7.04 | 3.07 | 2.28 |
| 10 | 20.93 | 11.07 | 5.87 | 1.61 | 0.61 |
| 12 | 20.71 | 10.78 | 5.56 | 1.23 | 0.15 |
| 14 | 20.65 | 10.72 | 5.48 | 1.13 | 0.03 |
| 16 | 20.64 | 10.71 | 5.47 | 1.12 | 0.01 |

FIG. 16

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

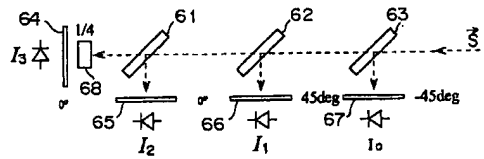
17/
30

FIG. 17

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

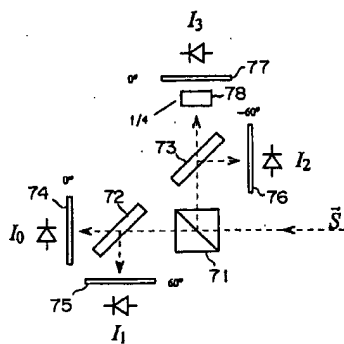
 $\frac{18}{30}$ 

FIG. 18

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

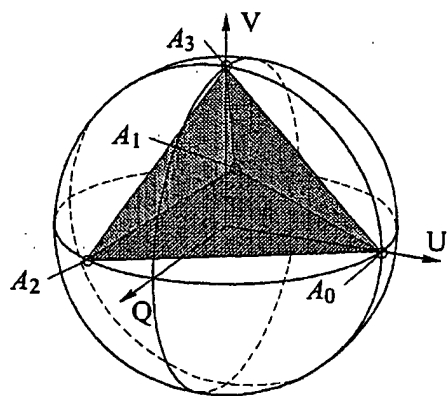
19/
30

FIG. 19

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

~~20/~~
30

| [bit] \ [°] | 2.0 | 1.0 | 0.5 | 0.1 | 0.0 |
|-------------|-------|------|------|------|-------|
| 8 | 18.77 | 9.95 | 5.64 | 2.28 | 1.59 |
| 10 | 17.87 | 9.0 | 4.65 | 1.21 | 0.42 |
| 12 | 17.67 | 8.79 | 4.43 | 0.95 | 0.12 |
| 14 | 17.64 | 8.76 | 4.38 | 0.89 | 0.03 |
| 16 | 17.63 | 8.75 | 4.37 | 0.88 | 0.008 |

FIG. 20

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

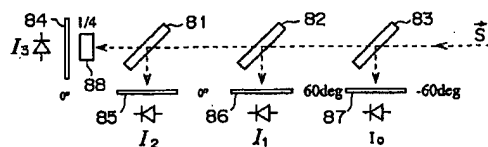
 $\frac{21}{30}$ 

FIG. 21

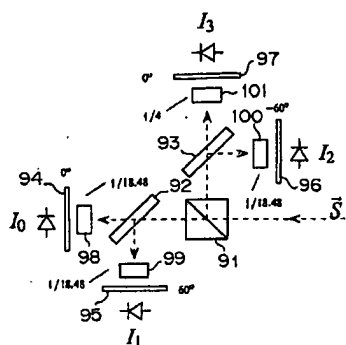
$$\frac{22}{30}$$


FIG. 22

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

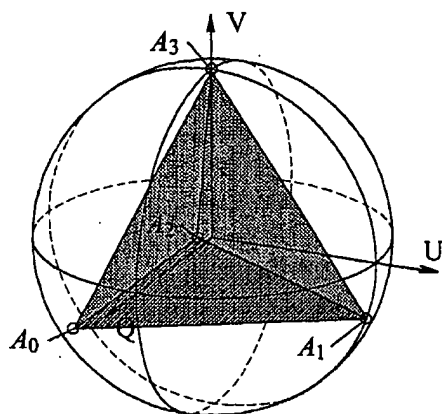
 $\frac{23}{30}$ 

FIG. 23

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

 $\frac{24}{30}$

| [bit] \ [°] | 2.0 | 1.0 | 0.5 | 0.1 | 0.0 |
|-------------|-------|------|------|------|-------|
| 8 | 15.82 | 8.44 | 4.82 | 1.95 | 1.38 |
| 10 | 15.13 | 7.65 | 3.96 | 1.01 | 0.35 |
| 12 | 14.95 | 7.45 | 3.75 | 0.8 | 0.09 |
| 14 | 14.91 | 7.41 | 3.7 | 0.75 | 0.02 |
| 16 | 14.9 | 7.4 | 3.69 | 0.74 | 0.005 |

FIG. 24

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

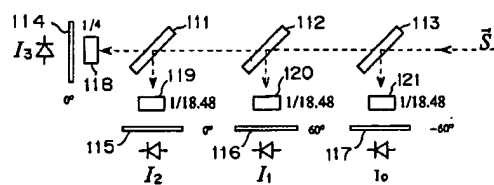
25/
30

FIG. 25

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

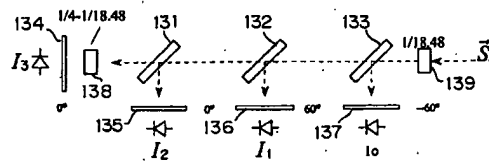
 $\frac{26}{30}$ 

FIG. 26

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

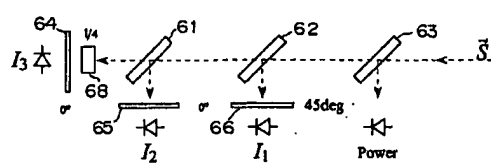
27/
30

FIG. 27

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

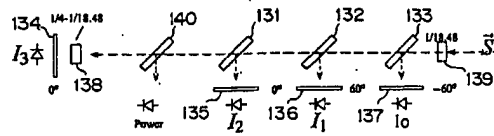
28/
30

FIG. 28

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

29/30

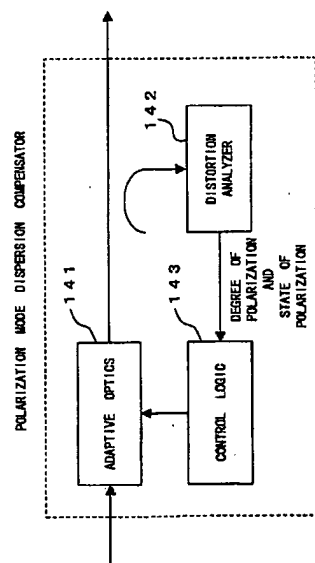


FIG. 29

WO 03/021822

PCT/JP01/07568

30/30

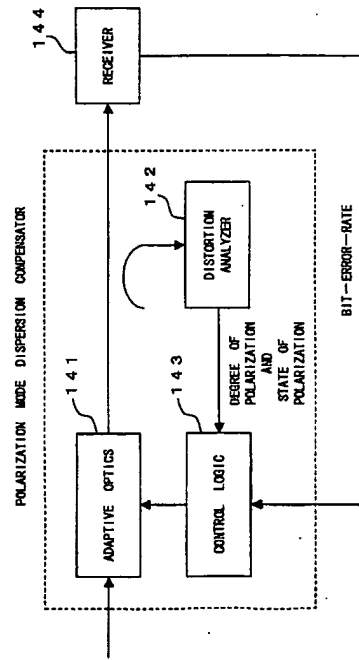


FIG. 30

【国際調査報告】

| | | |
|--|--|--|
| INTERNATIONAL SEARCH REPORT | | International Application No. PCT/JP 01/07568 |
| A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC 7 H04B10/18 601J4/00 | | |
| According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC | | |
| B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 7 H04B 601J | | |
| Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched | | |
| Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used) EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC | | |
| C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT | | |
| Category * | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
| X | WO 01 61385 A (MASSACHUSETTS INST TECHNOLOGY ; FINI JOHN M (US); CHOU PATRICK C (U) 23 August 2001 (2001-08-23) page 2, line 15 - page 3, line 18 | 1,2,10, 14 |
| A | page 5, line 10 - line 14 page 6, line 24 - page 8, line 6 page 9, line 10 - page 11, line 4 page 13, line 3 - page 15, line 8 page 22, line 1 - page 23, line 20 figures 1,2,4,6 | 5,7, 11-13 |
| A | US 5 337 146 A (AZZAM RASHEED M A) 9 August 1994 (1994-08-09) column 5, line 7 - column 6, line 36 column 7, line 48 - column 8, line 13 column 10, line 1 - line 41 figures 2,4,6 | 5,11-14 |
| -/- | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C. <input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex. | | |
| * Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier document but published on or after the international filing date "L" documents which may throw doubts on priority claims or which is cited to establish the publication date of another claim or other special reason (see specification) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principles or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or distinct or considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art. "Z" document member of the same patent family | | |
| Date of the actual completion of the international search 19 April 2002 | | Date of mailing of the international search report 08/05/2002 |
| Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.O. Box 5518 Patenkamp 2 NL - 2280 LV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 051 apo nl Fax (+31-70) 340-2070 | | Authorized officer Carrasco Comes, N |

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1992)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No.
PCT/JP 01/07568

| C. (Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT | | |
|---|--|-----------------------|
| Category * | Citation is required, with INCORPORATION appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
| A | EP 0 553 460 A (HEWLETT PACKARD CO) 4 August 1993 (1993-08-04) page 3, line 56 -page 4, line 46 figures 1,5-7 | 1-10,14 |

1

Form PCT/ISA/210 (preliminary of second sheet) July 1992

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No.
PCT/JP 01/07568

| Patent document cited in search report | | Publication date | Patent family member(s) | Publication date |
|---|---|---------------------|----------------------------|---------------------|
| WO 0161385 | A | 23-08-2001 | WO 0161385 A2 | 23-08-2001 |
| US 5337146 | A | 09-08-1994 | NONE | |
| EP 0553460 | A | 04-08-1993 | US 5227623 A | 13-07-1993 |
| | | | DE 69215071 D1 | 12-12-1996 |
| | | | DE 69215071 T2 | 30-04-1997 |
| | | | EP 0553460 A2 | 04-08-1993 |
| | | | JP 3213104 B2 | 02-10-2001 |
| | | | JP 5273082 A | 22-10-1993 |

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 2002)

フロントページの続き

(72)発明者 寺原 隆文

神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 富士通株式会社内

(72)発明者 大井 寛己

神奈川県川崎市中原区上小田中 4 丁目 1 番 1 号 富士通株式会社内

F ターム(参考) 2H079 BA02 CA04

5K102 AA01 AH22 KA05 KA33 MA03 MB12 MC06 MC07 MD01 MH03

MH14 MH32 PH22 PH23 RB01